

Michaela Pešková

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství
2303T002 – Strojírenská technologie

Vliv křivosti hrany vzorku na intenzitu a deformaci magnetické skvrny

The influence curvature of the edges of the sample on intensity and deformation of magnetic spot

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Rozsah práce a příloh

Počet stran	61
Počet tabulek	16
Počet obrázků	20
Počet grafů	8
Počet příloh	5

PROHLÁŠENÍ

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Liberci29.5.2014.

Michaela Pešková

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá vlivem křivosti hrany vzorku na intenzitu a deformaci magnetické skvrny. Je rozdělena na teoretickou a experimentální část.

V teoretické části jsou popsány metody, které se používají pro nedestruktivní zkoušení materiálů, princip metody magnetické skvrny a teorie litin.

Experimentální část je zaměřena na měření metodou magnetické skvrny a možný vliv zakřivení hrany vzorku na hodnoty zkoumaných veličin v NDT.

Na závěr je uvedeno zhodnocení výsledků z hlediska teorie vzniku zákalek na hranách výrobků z litin a ocelí ve strojírenském průmyslu a doporučení pro další výzkum.

Klíčová slova: nedestruktivní strukturoskopie, metoda magnetické skvrny, magnetické metody, magnetizace, litiny.

ANNOTATION

This diploma thesis deals with the influence curvature of the edges of the sample on intensity and deformation of magnetic spot. It is divided into theoretical and experimental part.

In the theoretical section are described methods, that are used for non-destructive testing of materials, the principle of the method magnetic spot and theory iron stains.

Experimental part focuses on measurement by method of magnetic spot and the possible influence of the curvature of the edges of the sample on the examined variables in NDT.

In conclusion you can see the evaluation of results from the theory of formation opacities on the edges of product from iron and steel in the engineering industry and recommendations for further research.

Key words: non-destructive structoscopy, method of magnetic spot, magnetic methods, magnetization, iron.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla především poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za podnětné připomínky, cenné rady a pomoc při její tvorbě. Poděkování patří i mé rodině za podporu při studiu a při psaní diplomové práce.

POUŽITÉ VELIČINY

δM	[%]	relativní odchylka
ρ	[kgm ⁻³]	měrná hmotnost
μ	[Hm ⁻¹]	permeabilita
μ_r	[Hm ⁻¹]	relativní permeabilita
μ	[-]	Poissonova konstanta
χ_m	[-]	magnetická susceptibilita
A	[-]	tažnost
A, B	[-]	konstanty získané lineární regresí z dvojic hodnot M – HB naměřených ze souboru vzorků konkrétního materiálu
B	[T]	magnetická indukce
C	[K]	Curierova teplota
Ce	[-]	Uhlíkový ekvivalent
c _C , c _{Si} , c _P	[hm. %]	jsou hmotnostní koncentrace prvků
c	[ms ⁻¹]	rychlost zvuku
c _L	[ms ⁻¹]	rychlost podélného šíření zvuku
d	[mm]	tloušťka polovodiče
E	[Mpa]	modul pružnosti
f _r	[s ⁻¹]	rezonanční frekvence
HB	[-]	tvrdost dle Brinella
H	[Am ⁻¹]	intenzita magnetického pole
H _o	[Am ⁻¹]	intenzita vnějšího magnetického pole
H _r	[Am ⁻¹]	intenzita zbytkového magnetického pole
H _{rL}	[Am ⁻¹]	intenzita zbytkového magnetického pole při tloušťce L
H _{rL12}	[Am ⁻¹]	intenzita zbytkového magnetického pole pro tloušťku 12mm
I	[A]	proud
I _r	[T]	remanentní polarizace
m	[-]	stínící účinek

M	[Am-1]	intenzita zbytkového magnetického pole
M1-M4	[Am-1]	naměřené veličiny intenzita zbytkového magnetického pole
ML	[Am-1]	intenzita zbytkového magnetického pole dané tloušťky
M _R	[Am-1]	remanentní magnetizace
M _{r50}	[Am-1]	remanentní magnetizace na poloměru R50
N	[-]	demagnetizační činitel
R _m	[Mpa]	mez pevnosti
R	[-]	velikost odrazu tlaku akustické vlny
R	[mm]	poloměr měřené hrany měřená hrana
R _H	[Ω]	odpor
Se	[-]	stupeň eutektičnosti
T	[°C]	teplota
T _c	[°C]	Curierova teplota
ti	[mm]	vzdálenost od snímače
U _H	[V]	Hallovo napětí
Z	[Mpas ⁻¹]	vlnový odpor

POUŽITÉ ZKRATKY

AE	akustická emise
ARA	diagram anizotermického rozpadu austenitu oceli
ET	metoda vířivých proudů
GE_s, Ge_f	začátek a konec vzniku grafitického eutektika
HBS	tvrdost
IRA	diagram izotermického rozpadu austenitu oceli
LT	hledání těsnosti
L_s, L_f	začátek a konec vzniku metastabilního eutektika
MT	magnetická prášková metoda
NDT	nedestruktivní zkoušení
PT	kapilární metoda
$t_{ES1}-t_{ES2}$	teplotní interval tvorby stabilního eutektika
$t_{EM1}-t_{EM2}$	teplotní interval tvorby metastabilního eutektika
UT	ultrazvukem
VT	vizuální metoda
RT	radiologické metody
RTG	rentgenové záření

OBSAH

PROHLÁŠENÍ.....	3
PODĚKOVÁNÍ.....	5
1 Úvod.....	11
2 Teoretická část.....	12
2.1 Nedestruktivní testování materiálů.....	12
2.1.1 Úvod.....	12
2.1.2 Nedestruktivní strukturoskopie.....	13
2.1.3 Nedestruktivní metody.....	15
2.1.3.1 Ultrazvuková metoda.....	15
2.1.3.2 Metoda vířivých proudů.....	17
2.1.3.3 Metoda magnetické skvrny.....	18
2.1.3.4 Metoda akustické emise.....	19
2.1.3.5 Prozařovací metody.....	20
2.1.3.6 Akustické metody zkoušení.....	22
2.2 Metoda magnetické skvrny.....	22
2.2.1 Magnetické vlastnosti látek.....	22
2.2.1.1 Diamagnetismus.....	23
2.2.1.2 Paramagnetismus.....	23
2.2.1.3 Feromagnetismus.....	24
2.2.1.4 Curierova teplota a magnetické domény.....	25
2.2.1.5 Magnetická hystereze.....	26
2.2.2 Princip metody magnetické skvrny.....	27
2.3 Litiny.....	31
2.3.1 Význam litin.....	31
2.3.2 Krystalizace litin.....	32
2.3.3 Rozdělení litin.....	35
2.3.3.1 Bílá litina.....	35
2.3.3.2 Temperovaná litina.....	35
2.3.3.3 Grafitické litiny.....	36
2.3.3.4 Tvrzená litina.....	36
2.3.3.5 Legované litiny.....	37
2.3.3.6 Šedá litina.....	37
2.4 Ocel.....	38
2.4.1 Diagram anizotermického rozpadu austenitu oceli.....	38
2.5 Oduhličení.....	40
3 Experimentální část.....	41
3.1 Použité vzorky.....	41
3.1.1 Charakteristika použitých materiálů.....	41
3.2 Měření metodou magnetické skvrny.....	42
3.2.1 Princip měření.....	42
3.2.2 Přístroj a pomůcky pro měření.....	42
3.2.3 Popis měření.....	44
3.2.3.1 Úprava vzorků.....	44
3.2.4 Postup měření.....	45
4 Výsledky a diskuse.....	47
4.1 Naměřené hodnoty a grafy.....	47
4.1.1 Výsledné hodnoty pro litinový vzorek.....	47

4.1.2 Výsledné hodnoty pro ocelový vzorek	52
4.2 Diskuse výsledků	57
5 Závěr	58
6 Použitá literatura	59
7 Seznam příloh	61

1 Úvod

Stejně jako v jiných odvětvích i ve strojírenském průmyslu dochází k vyšším nárokům a požadavkům ze strany zákazníka, což vede k vylepšování stávajících technologií a zároveň k vyvíjení nových směrů a cest pro zdokonalení nejen materiálů a jejich vlastností, ale zároveň zdokonalení metod pro měření strukturních vlastností daného materiálu, bez použití destruktivních zásahů na měřený výrobek. Snahou je určování strukturních vlastností materiálu pomocí jednoho přístroje.

Obecně se nedestruktivní testování dělí do mnoha skupin podle využívaných fyzikálních principů. Účelem této práce je zaměřit se, na metody magnetické a to především na metodu magnetické skvrny. Magnetické metody zkoušení, umožňují zkoumat strukturní změny u feromagnetických materiálů -ocelí a litin, které jsou nečastěji používané v průmyslu. Na hodnotu měřené veličiny – intenzitu zbytkového magnetického pole H_r má kromě struktury vliv i geometrie měřeného objektu v nejbližším okolí snímače. Dosavadní studentské práce popsali matematický vliv tloušťky objektu.

Cílem této práce je na vzorcích simulujících hrany s různou ostroostí naměřit zbytkový magnetismus a vypracovat matematickou regresí vzorce na přepočet zbytkového magnetismu pro polorovinu; kvantifikovat strukturní a geometrický podíl měřené intenzity zbytkového magnetického pole změřeného na hraně odlitku, tepelně zpracovávaného výrobku. Právě na hranách díky intenzivnímu ochlazování vznikají zákalky, extrémní tvrdosti, ale i oduhličení, které je třeba detekovat.

V této práci probíhalo měření na komerčně vyráběném přístroji, využívající metodu magnetické skvrny DOMENA B3.b.

V teoretické části jsou popsány základní pojmy a metody nedestruktivního zkoušení materiálu, dále je blíže specifikována metoda magnetické skvrny a teorie litin. Experimentální část práce se měřením intenzity zbytkového mag. pole pomocí přístroje Domena, na hranách vzorků a následné vyhodnocení pomocí grafů. Získané hodnoty a jejich vyhodnocení jsou obsaženy ve výsledcích a diskusi.

2 Teoretická část

2.1 Nedestruktivní testování materiálů

2.1.1 Úvod

Nedestruktivní zkoušení se řadí jako součást oboru technologie. Pod nedestruktivním zkoušením (obecně zkratka NDT) rozumíme metody jimiž se nenaruší použitelnost, schopnost plnit předpokládanou funkci výrobku, materiálu, systému. Řada technologií je nedestruktivní, ale specificky se nepoužívají pro hodnocení materiálu. Moderní nedestruktivní zkoušení zajišťuje celistvost výrobku a tím garantuje spolehlivost. Předchází selhání výrobků vlivem poruch, předchází úrazům. Ochraňuje investice, čímž přispívá k jejich návratnosti. Udržuje dobrou pověst výrobce a spokojenost zákazníků. Snižuje výrobní náklady a udržuje stejnou úroveň deklarované kvality [1].

U nás metoda magnetické skvrny byla vyvinuta na počátku 80. let ve slévárenské pobočce SVÚM Brno v souvislosti s výzkumem litin pro bloky a hlavy válců vznětových motorů Liaz [1].

Slitiny železa (oceli a litiny) tvoří spektrum nejrozšířenějších konstrukčních materiálů. Feromagnetické vlastnosti lze přiřadit jejich drtivé většině. Aplikační rozšíření metoda našla ve formě impulsní magnetické kontroly ocelových plechů hlavně v Rusku a litinových odlitků v Čechách. V Evropě se pro tuto oblast materiálů využívá výhradně magnetoinduktivní střídavé metody [1].

V současnosti se pulsní magnetickou metodou zabývají především v Institutu Aplikované Fyziky Běloruské akademie věd a to již posledních 30 let. Metoda je založena na místním působení pulsního magnetického pole na testovaný výrobek a měří se intenzita remanentní magnetizace. Je aplikována na měření tvrdosti, meze pevnosti, meze kluzu, prodloužení či zúžení válcovaných výrobků z nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí. Jsou používány přístroje IMA ke stacionárnímu měření a přístroje IMPOK k měření pohybujících se plechů ve výrobní lince. Jsou používány

v mnoha hutních podnicích v Rusku, Ukrajině, Japonsku či firmou EKO v Německu a VSŽ Košice na Slovensku [2].

Ovšem aplikací magnetického bodového pólu na litiny či podobně disperzní materiály se zabývá pouze katedra materiálu TUL. V žádném z dostupných zdrojů není zmínka o aplikaci metody magnetického bodového pólu na litiny [2].

2.1.2 Nedestruktivní strukturoskopie

Defektoskopie se zabývá zjišťováním povrchových a vnitřních vad, které porušují celistvost materiálu. Ke vzniku vady může dojít nejen v technologickém výrobním procesu, ale samozřejmě i v provozu (degradační procesy, náhodným přetížením). Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka složení, struktury a vlastností výrobku od jeho charakteristik předepsaných technickými podmínkami nebo normami [2].

Zkušební defektoskopické metody jsou založeny na indikaci změn fyzikálních veličin (intenzity pronikajícího záření, rozptylu magnetického toku aj.), které vznikají na nespojitostech prostředí (materiálu zkoušeného předmětu). Jedná se o metody prozařovací, ultrazvukové pro zjišťování vnitřních vad a magnetické práškové, vizuální a další ke zjišťování vad povrchových či těsně podpovrchových [2].

Strukturoskopie, neboli bezdemontážní diagnostika struktury je založena na souvislostech mezi fyzikálními vlastnostmi a strukturně-mechanickými parametry materiálu. Zabývá se zjišťováním struktury a složením materiálu. V průmyslu se používají metody vířivých proudů (pro hodnocení železných i neželezných slitin) a impulsní magnetické metody (pro hodnocení feromagnetických slitin). K tomuto účelu se využívají metody akustické, vířivých proudů a magnetické. Ve specifických oblastech výroby jako například slévárenství je její význam pro výrobu kvalitního finálního výrobku (litinových odlitků) více než nezbytný [2].

Obor nedestruktivního zkoušení (NDT) má v jednotlivých státech vlastní organizační strukturu. Pevný řád kvalifikace pracovníků (EN 473) způsobilých provádět zkoušení, jednoznačnou terminologii, požadavky na certifikaci měřicí techniky a způsobilost zkušebních pracovišť i laboratoří v jednotlivých zkušebních metodách předepisuje na 114 státních norem. V souvislosti se vstupem do EU probíhá intenzivní

normalizační přizpůsobování, takže většina norem má označení ČSN EN (ISO) s tří až pětímístným číslem. Původní a pro nás ještě přehledná struktura šestičíslí ČSN se uvádí jenom jako doplňkové orientační značení. Je však nesmírně důležitá, neboť tvoří přehlednou strukturu, v které se může technik spolehlivě orientovat, na rozdíl od náhodného systému značení čísel norem EN, ISO. Během posledních tří let stoupl množství přijatých EN norem ze 114 na 182[2].

Těchto 182 norem ošetřuje následující metody zkoušení (tučné tvoří mezinárodní označení):

MT	magnetická prášková
PT	kapilární
ET	vířivých proudů
LT	hledání těsnosti
RT	radiologické
VT	vizuální
UT	ultrazvukem
AE	akustická emise [2]

Většina z nich má obecný charakter nebo se zabývá zkoušením ocelových svarů, trub, tlakových nádob, tyčí, výkovků apod.. Tyto normy se zabývají klasickou defektoskopií, tady technikami hledání a prezentacemi vad spojitosti. Ve slévárenství se uplatňují a předmětem přejímacích podmínek jsou metody RT a UT pro vnitřní vady a MT s PT pro povrchové vady [2].

Nedestruktivní strukturoskopie z uvedeného pohledu norem zůstává stranou, bez sjednocujícího prvku. Ve specifických případech, zejména ve slévárenství litin však její význam pro výrobu kvalitního finálního odlitku převažuje nad defektoskopií [2]. Strukturoskopie kvantifikuje vztah mezi fyzikálně nedestruktivně měřenou veličinou a mechanickou vlastností, metalografickým parametrem struktury nebo napětí, (mechanickým) [2].

2.1.3 Nedestruktivní metody

2.1.3.1 Ultrazvuková metoda

Při zkouškách ultrazvukem se využívá odrazu ultrazvuku na rozhraní dvou prostředí, jako jsou póry, trhliny, dutiny apod. Používají se podélné anebo příčné ultrazvukové vlny o frekvencích 1 až 10 MHz. Podélné ultrazvukové vlny se mohou šířit v tuhých, kapalných i plynných látkách, zatímco ultrazvukové vlny příčné pouze v látkách tuhých. Rychlost šíření podélných ultrazvukových vln v oceli je 5800m/s, přičemž příčné mají řádově poloviční rychlost šíření [2].

Prostupnost akustických vln materiálem klesá s útlumem hmoty matrice a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Za nespojitost lze považovat inkluze se značně odlišným vlnovým odporem Z vůči matici [2].

$$Z = c \cdot \rho \quad (1)$$

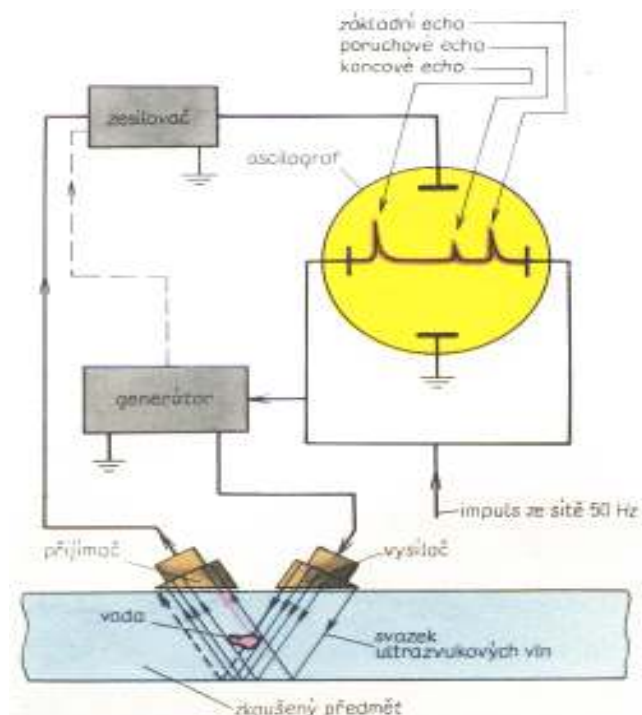
kde: Z – vlnový odpor [$\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$], c – rychlost zvuku [ms^{-1}], ρ – měrná hmotnost [kgm^{-3}]

Ultrazvukové zkoušky je možné podle uspořádání rozdělit na metodu průchozí a odrazovou.

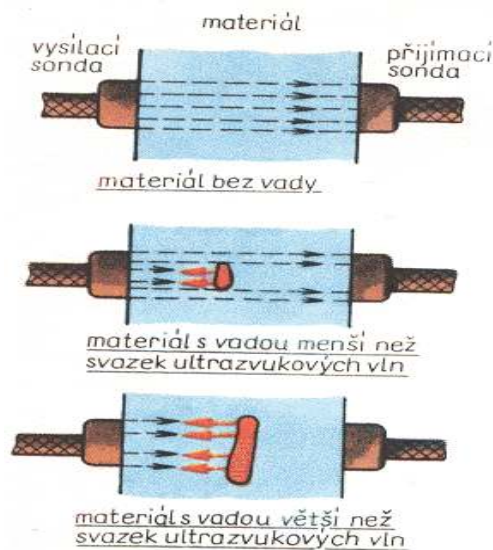
Metoda průchozí - je založena na měření ultrazvukové energie, která projde zkoušeným předmětem. Pracuje se dvěma sondami, vysílací a přijímací, které jsou umístěny proti sobě, což je jedna z nevýhod této metody. Tuto metodu lze využít pouze pokud je stěna předmětu přístupná z obou stran. Pokud je v materiálu vada, ultrazvukové vlny se od ní odrážejí. Za vadou se vytváří stín. Metoda je vhodná pro zkoušení menších tloušťek [2].

Metoda odrazová - tato metoda se používá nejvíce a to pro tloušťky materiálu od 10 mm. Do kontrolovaného předmětu se vysílají krátké ultrazvukové impulsy, které se odrážejí od povrchu předmětu a jeho vnitřních vad. Po odrazu v materiálu se ultrazvukové vlny vrátí na přijímač. Časový průběh se zobrazuje na obrazovce osciloskopu. Tato metoda je velmi citlivá a umožňuje velmi dobrou reprodukci výsledků [14].

Ultrazvuk můžeme použít pouze u materiálů, ve kterých se zvuk šíří, aniž by se nadměrně pohlcoval nebo tlumil a dosah zvukové energie svazku byl malý [14].



Obr. 2.1: Impulsní odrazová metoda [7].



Obr. 2.2: Průchodová metoda [7].

Zkoušení ultrazvukem je vhodné pro materiály velké tloušťky a tehdy, kdy jiné způsoby zkoušení nedávají uspokojivé výsledky. Výhodou zkoušení ultrazvukem je malý rozměr přístroje a jeho snadná přenosnost, zkoušky jsou zdravotně nezávadné [7].

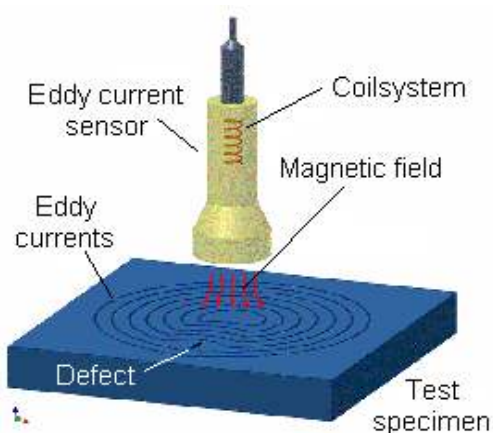
2.1.3.2 Metoda vířivých proudů

Střídavé magnetické pole cívky zkušebního přístroje indukuje v povrchu výrobku střídavé proudy, jejichž hustota je závislá i na vodivosti materiálu výrobku [2].

Vady v povrchových vrstvách vodivost místně zhoršují, což se zpětně projevuje změnou elektrického napětí na cívce. Vířivé proudy jsou tvořeny při elektromagnetické indukci. Když střídavý proud prochází vodičem, jako například měděným drátem, vytváří se kolem vodiče magnetické pole. Velikost tohoto magnetického pole závisí na velikosti protékajícího proudu. Jestliže se další elektrický vodič dostane do takového magnetického pole, pak se v tomto vodiči bude indukovat proud. Vířivé proudy jsou indukované elektrické proudy tekoucí po kruhové dráze [2].

Testování pomocí vířivých proudů je používáno v různých průmyslových odvětvích pro hledání defektů a dalších měření. Hlavní význam metody leží v odhalování defektů, pokud je dobře známa jejich povaha. Obvykle se metoda používá pro vyšetření poměrně malých oblastí. Vířivé proudy mají sklon soustředit se na povrchu materiálu a tudíž mohou být užívány jen pro odhalení povrchových a podpovrchových vad. V tenkých materiálech jako například trubky vířivé proudy mohou být užívány pro změření tloušťky materiálu [2]. Touto metodou je možné třídit materiály na základě chemického složení nebo tepelného zpracování [12].

Hlavními přednostmi metody jsou rychlost zkoušení, snadná automatizovatelnost a hodnocení [12].



Obr. 2.3: Měření povrch vrstev metodou vířivých proudů [13].

2.1.3.3 Metoda magnetické skvrny

Patří mezi magnetické strukturoskopické metody, založené na využití souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi a strukturně-mechanickým stavem materiálu. Jde o metodu rychlou, splňující požadavky současného výrobního provozu. V současné době se k měření metodou magnetického bodového pólu používá přístrojů řady DOMÉNA, které navazují na předchozí sérii přístrojů REMAG [10].

Lze pomocí přístrojů DOMÉNA měřit nejen tvrdost feromagnetických materiálů, ale i pevnost či hloubku prokalení [10].

V porovnání s klasickými způsoby měření tvrdosti je tato metoda velmi rychlá, nedestruktivní, umožňuje měřit tvrdost materiálu i přes povrchovou vrstvu [10].

U zkoušeného objektu (např. Odlitku) se pomocí magnetovací cívky sondy vytvoří na povrchu objektu magnetická skvrna – tzv. „bodový pól“. Po zániku proudového pulsu v magnetovací cívce se citlivými snímači měří remanentní intenzita magnetického pole v povrchové a podpovrchové vrstvě materiálu vzorku [10].

Snímače, nejčastěji Hallovy, jsou diferenciálně zapojeny a měří gradient normálové složky remanentní intenzity. Metoda využívá přímé souvislosti mezi remanentní intenzitou a strukturně-mechanickým stavem materiálu. Se strukturně-mechanickým stavem materiálu lépe koresponduje koercitivní intenzita, ale její hodnoty jsou velmi nízké, proto se přednostně vyhodnocuje remanentní intenzita magnetického pole [10].

Feromagnetické látky magneticky tvrdé si po vyjmutí z vnějšího magnetického pole uchovávají své magnetické vlastnosti (v materiálu přetrvává remanentní indukce). Přispívá k tomu též existence poruch krystalové mřížky (dislokací) a jiných překážek, např. Atomy uhlíku, částice cementitu, které brání návratu domén do jejich původní orientace a do celkově magneticky neutrálního stavu. Souvislost mezi mechanickou a magnetickou tvrdostí materiálu je dána přítomností magneticky tvrdých strukturních složek (lamely perlitického cementitu, martenzit), které jsou zároveň i mechanicky tvrdé [10].

Princip této metody spoívá v měření intenzity zbytkového magnetického pole kontrolovaného materiálu pod čelem sondy, jejíž hodnota přímo závisí na množství a disperzi perlitu či martenzitu ve struktuře.

V polovodiči o tloušťce d . Pro Hallovo napětí U_H na elektrodách platí vztah [10]:

$$U_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{d} \quad (2)$$

kde: U_H – Hallovo napětí [V], R_H – odpor [Ω], I – proud [A], B – magnetická indukce [T], d – tloušťka polovodiče [mm]

Hodnota H_r se posléze zobrazí na displeji přístroje. Hallův snímač registrující remanentní intenzitu je polovodičový prvek, jenž využívá vlivu magnetické indukce na vychylování nosičů nábojů el. proudu [10].

2.1.3.4 Metoda akustické emise

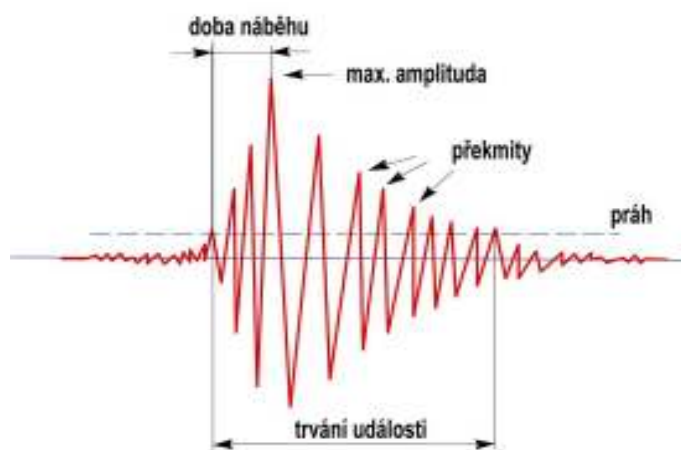
K akustické emisi dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie způsobené vnitřními nebo vnějšími silami. Vznik akustické emise je generován nevratnými dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálu, kavitačními procesy v hydrodynamických systémech, turbulencí při úniku kapaliny z potrubí, degenerací dielektrika atd. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napěťový impuls šířící se materiálem jako elastická napěťová podélná nebo příčná vlna. Složka vlny kolmá k povrchu tělesa je nejčastěji detekována širokopásmovým (od 100 kHz do 4 MHz) piezoelektrickým senzorem s rezonanční frekvencí nad měřeným spektrem akustické emise nebo citlivějším rezonančním senzorem s více rezonancemi. U moderního provedení senzorů je v pouzdru zabudován předzesilovač a snímač je tak schopný, i když je energie vlny velmi malá, vyhodnotit dislokace v materiálu v řádech 10^{-14} m [8].

Základní vyhodnocení signálu provádí měřicí systém akustické emise. Podle charakteru signálu rozlišujeme:

spojitá emise, resp. kvazispojitá emise - Signál po delší dobu neklesá pod nastavenou prahovou hodnotu. Typickým příkladem zdroje spojitě akustické emise jsou úniky média pod tlakem [11].

nespojité emise - Signál má charakter jednotlivých, časově výrazně oddělených balíků. Typickým příkladem nespojité akustické emise jsou např. vznik mikrotrhlin, růst trhliny, klepání uvolněných částí [11].

K měření akustické emise používáme obvykle více snímačů rozmístěných na konstrukci, které dohromady tvoří měřicí síť. Tato síť umožňuje lokalizaci místa původu emisních událostí [11].



Obr. 2.4: Hodnocené parametry signálu akustické emise [11].

Výhodou akustické emise oproti jiným defektoskopickým metodám je kontinuální monitorování objektu a úspora času v porovnání s postupným testováním jinými metodami [8].

Nevýhodou metody je, že příčinu vzniku akustické vlny přesně neznáme, neboť uvolněná energie je ovlivňována řadou faktorů jako je tvar a povrch tělesa, přenosová cesta vlny (funkce šíření akustické vlny) daná strukturou a homogenitou materiálu [8].

2.1.3.5 Prozařovací metody

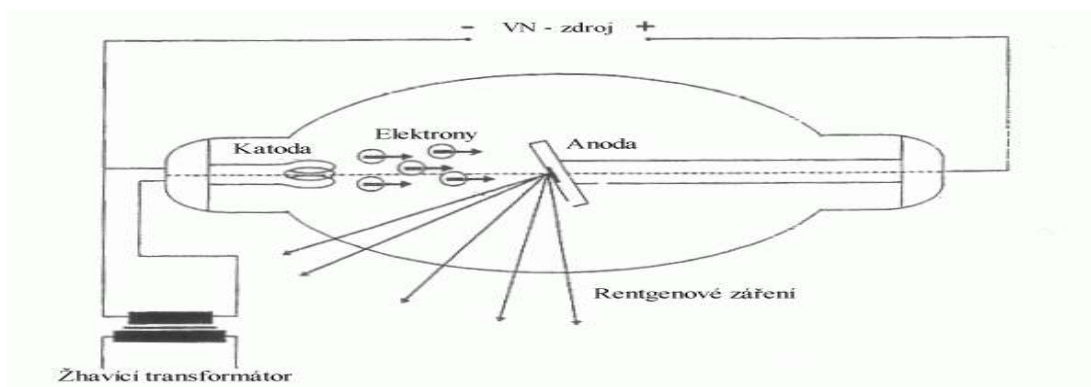
Zkouška prozařováním RTG a gama záření

Oba druhy záření jsou elektromagnetická vlnění s velmi malou vlnovou délkou (kratší než vlnová délka viditelného spektra světla). Princip metody je u obou druhů záření stejný. Záleží na schopnosti obou záření pronikat materiálem a působit na citlivou vrstvu fotografického materiálu. Při průchodu záření materiálem dochází k různému stupni zeslabení jeho intenzity podle tloušťky materiálu, jeho chemického

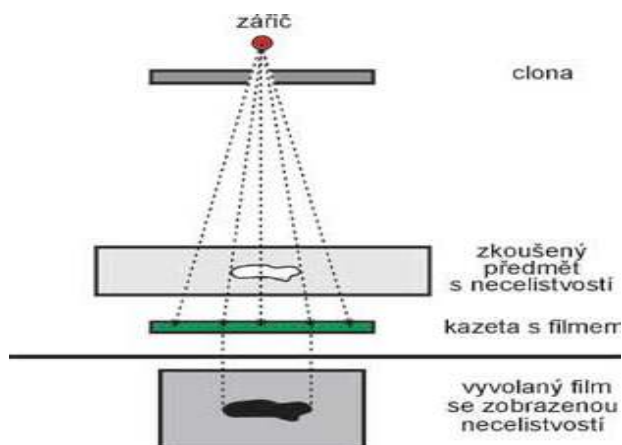
složení, množství vad (např. vměstků), dutin apod. Na film tak dopadá záření o různé intenzitě, což způsobí jeho zčernání. Vady materiálu téměř vždy zeslabují tloušťku stěny, a proto se na filmu po jeho vyvolání projeví jako tmavší skvrny v méně zčernalém okolí. Jako zdroje RTG záření se používá zařízení, která pracují s napětím nejčastěji od 50 do 300 kV. Zdrojem záření gama jsou umělé radioizotopy (kobalt, cesium, iridium) [9].

Záření vlnové délky větší než 0,1 nm je nazýváno měkké a kratší tvrdé rentgenové záření. Vlnové délky nejenergičtější části se částečně překrývají se zářením gama, avšak rozlišujeme je dle původu. Foton rentgenového záření vzniká při interakcích vysoce energického elektronu, kdežto záření gama při procesech uvnitř jádra atomu [15].

Použití: **RTG** paprsky u oceli do tl. 90mm, u hliníku do 400mm, **gama** paprsky u oceli do tl. 300Mm [9].



Obr. 2.5: Schéma vzniku RTG záření [9].



Obr. 2.6: Princip metody prozařování RTG paprsky [9].

2.1.3.6 Akustické metody zkoušení

Poněvadž struktura a chemické složení materiálu má značný vliv na některé vlastnosti ultrazvuku při jeho průchodu danou látkou, využívá se změn těchto vlastností k posuzování stavu struktury, popř. chemického složení [10].

Akustické vlastnosti materiálu jsou popsány rychlostí šíření pružného příčného či podélného kmitání atomů kolem jejich rovnovážných poloh a dále jejich útlum [10].

Pro rychlost podélného šíření zvuku platí vztah:

$$c_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (3)$$

kde: E – Youngův modul pružnosti [MPa], ρ – měrná hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

μ – Poissonova konstanta (součinitel příčné kontrakce) [-]

Prostupnost akustických vln procházejících materiálem klesá s rostoucím útlumem a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí, čehož se využívá při hodnocení struktury litin [10].

U grafitických litin představuje grafit ve struktuře významnou vnitřní nespojitost se značně odlišným vlnovým odporem Z_g vůči ocelové matici Z_m . Vlnový odpor Z lze obecně vyjádřit jako součin fázové rychlosti šíření a hustoty, tedy [10]:

$$Z = c \cdot \rho \quad (4)$$

kde: Z – vlnový odpor [$\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$], c – rychlost zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], ρ – měrná hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

2.2 Metoda magnetické skvrny

2.2.1 Magnetické vlastnosti látek

Magnetické vlastnosti látek jsou charakterizovány vektorem magnetizace, permeabilitou μ a magnetickou susceptibilitou χ_m . Vlastní příčinou magnetických vlastností látek jsou magnetické dipóly, které jsou buď permanentní, nebo se indukují při působení vnějšího magnetického pole. Jestliže v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole neobsahuje látka magnetické momenty, hovoříme

o tzv. diamagnetikách, v opačném případě o paramagnetikách. Zvláštním případem paramagnetik jsou tzv. feromagnetika resp. feromagnetika, ve kterých jsou permeabilita a susceptibilita podstatně větší než v ostatních paramagnetikách. K diamagnetickým látkám patří všechny inertní plyny, některé kovy (Au, Mg), nekovy (Si, P, S) a mnohé organické sloučeniny. K paramagnetickým látkám patří všechny soustavy volných atomů a iontů, kapaliny a některé vzácné zeminy. Paramagnetiky se stávají i všechny feromagnetické látky nad tzv. Curieho teplotou. Dobrymi feromagnetiky jsou Fe, Ni, Co a slitiny, které obsahují alespoň jednu z těchto složek. V poslední době se ukázalo, že feromagnetické vlastnosti mohou existovat jak v krystalickém, tak i nekrystalickém uspořádání [3].

2.2.1.1 Diamagnetismus

Diamagnetizmus látek je způsoben magnetickými momenty atomů elektricky nabitých částic, které indukují samotné vnější magnetické pole. V souladu s obecným zákonem přírody, podle kterého následek vyvolává jevy, které kompenzují příčinu, lze očekávat, že dostatečné magnetické pole od indukovaných dipólů bude zeslabovat původní pole, které ho způsobilo. Výsledné pole je proto vždy menší než původní (magnetující) pole, což se odrazí v tom, že relativní permeabilita μ_r těchto látek je menší jak 1 a větší než 0 [3].

2.2.1.2 Paramagnetismus

Paramagnetizmus látek je způsoben tím, že atomy a molekuly mají své stálé nenulové magnetické momenty, které jsou však v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole v důsledku chaotického pohybu rozloženy tak, že se navzájem úplně kompenzují. Navenek je tedy látka nemagnetická. Až přítomnost vnějšího magnetického pole vyvolává "orientující" účinek, magnetické pole natáčí magnetické dipóly do směru, ve kterém jsou souhlasně orientovány se směrem indukce magnetického pole. To má za následek zesílení původního pole, což se odrazí v tom, že relativní permeabilita μ_r těchto látek je větší než 1 [3].

Mírou zmagnetování látky je vektor magnetizace M , který udává objemovou hustotu magnetického momentu [4]:

$$M = \frac{d\mu}{dV} \quad (5)$$

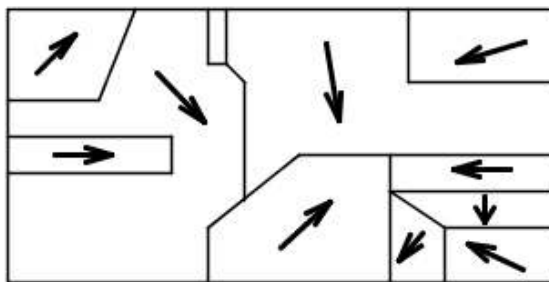
kde: $M=[A.m^{-1}]$

2.2.1.3 Feromagnetismus

Feromagnetické látky se vyznačují tím, že jejich relativní permeabilita $\mu_r=1+\chi_m$ a rovněž i magnetická susceptibilita χ_m mají velké hodnoty - až 10^6 . Magnetické pole podmíněné uspořádáním magnetických dipólů je tedy podstatně silnější než vnější magnetické pole [3].

Účinky indukovaných magnetických momentů v látce feromagnetické dokonce často v pozorovaných výsledných polích převládají. Feromagnetismus je důsledkem čistě kvantového jevu, nazývaného výměnná interakce. Spiny velmi blízkých atomů se souhlasně orientují i přes rušivý vliv tepelného pohybu. Při chladnutí roztaveného feromagnetika se vytvářejí Weissovy oblasti spontánní magnetizace, které se často označují termínem domény. V doménách jsou atomové magnetické momenty uspořádány do souhlasných směrů. Jednotlivé domény jsou však orientovány chaoticky a navenek se proto neprojevují [4].

Domény spontánní magnetizace jsou od sebe odděleny tenkými, několik set atomových rovin silnými hraničními vrstvami, ve kterých se magnetizace ze směru v jedné doméně otáčí do směru ve vedlejší doméně. Těmito hraničním vrstvám říkáme též Blochovy stěny. K vytvoření Blochových stěn je však třeba v důsledku nerovnoběžnosti elementárních magnetických momentů v ní vynaložit jistou energii [3].



Obr. 2.7: Schéma doménové struktury [6].

Vložíme-li látku do vnějšího magnetického pole, porostou domény s magnetickými dipólovými momenty ve směru pole na úkor ostatních, případně se budou orientovat do směru pole. Tyto dva jevy magnetické pole v látce podstatně zesilují a jejich průběh silně závisí na charakteru izotropie látky [4].

2.2.1.4 Curierova teplota a magnetické domény

Feromagnetismus se projevuje jen tehdy, je-li látka v krystalickém stavu – v kapalném nebo plynném stavu se chovají jako látky paramagnetické. Feromagnetismus je vlastností struktury, ne jednotlivých atomů. Pro každou feromagnetickou látku existuje určitá teplota tzv. Curieova teplota, při jejímž překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se látkou paramagnetickou [5].

Po překročení Curieho teploty (řádově stovky stupňů Celsia) je tepelný pohyb tak intenzivní, že se vzniklé magnetické domény rozpadají zpět na jednotlivé atomy [5].

Vzniku domén totiž brání vnitřní tepelný pohyb částic. Proto se tyto domény snáze vytvoří v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Před opětovným vytvořením magnetických domén je nutný ohřev na Curieovu teplotu proto, aby se intenzivním tepelným pohybem rozpadly zbytky magnetických domén, které mohly ve struktuře látky zůstat z předchozího magnetování. Bez ohřevu na Curieovu teplotu by bylo nutné použít velmi silné vnější magnetické pole. K natočení domén je nutno dodat určitou energii, je nutné vykonat určitou práci. A tuto energii je možné získat ohřevem materiálu (částice i domény začnou intenzivněji vibrovat a je tedy snadnější je překloupit do žádané polohy) a nebo silným magnetickým polem (magnetická síla se bude snažit domény natočit tak, aby byly v energeticky výhodném stavu) [5].

$$\chi_m = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - T_c} \quad (6)$$

kde: χ -magnetická susceptibilita [-], M – magnetizace [Am^{-1}], H – intenzita magnetického pole [Am^{-1}], T_c - Curierova teplota [$^{\circ}\text{C}$], T- teplota [$^{\circ}\text{C}$], C – Curierova teplota [K] [4]

Tab. 2.1: Příklady Curierovy teploty u feromagnetických látek [3,16].

Látka	T_c [$^{\circ}\text{C}$]
Fe	768
Co	1130
Ni	358
Fe_2O_3	622

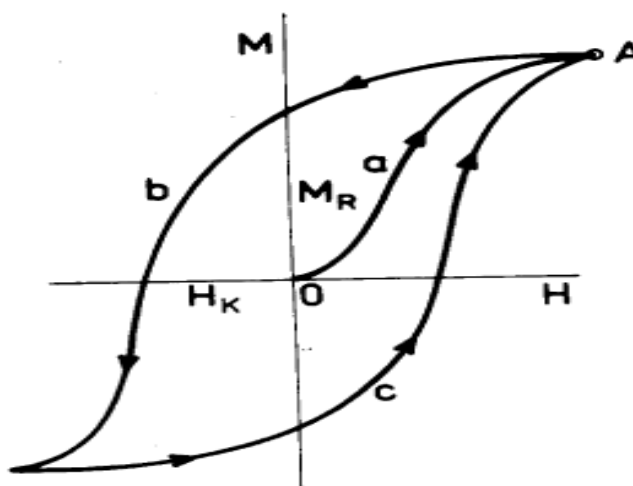
2.2.1.5 Magnetická hystereze

Průběh závislosti magnetizace M na intenzitě magnetujícího pole H je znázorněn na obr. 2.8. Po připojení magnetického pole malé intenzity se v magnetiku objevuje nenulová výsledná magnetizace. Původně chaoticky orientované domény se začínají posuvem Blochovy stěny zvětšovat na úkor domén s jinou orientací magnetického momentu. Tento proces pokračuje do té doby, dokud se nedosáhne úplná orientace všech magnetických momentů domén. Vznikne tak stav nasycené magnetizace (bod A na obr. 2.8). Při dostatečně rychlém poklesu magnetického pole nestačí domény zaujímat původní chaotické rozložení (křivka b na obr. 2.8), takže i při $H=0$ zůstává ještě těleso částečně zmagnetováno. Příslušná magnetizace se nazývá remanentní magnetizace M_R . Magnetizace klesne na nulu až při aplikování určité opačně orientované intenzity vnějšího magnetického pole, které se nazývá koercitivní síla H_K . Při opakovaném vzrůstu vnějšího pole pokračuje magnetování podle křivky c [3].

Při magnetování střídavým magnetickým polem se tedy objevuje určitá setrvačnost procesů, tzv. hystereze. Křivky **b** a **c** vytvářejí tzv. hysterezní smyčku. Podle její plochy rozeznáváme tzv. Měkké magnetické materiály (malá plocha) a tvrdé

magnetické materiály (velká plocha). Prvé jsou vhodné ke konstrukci jader do cívek a transformátorů, druhé na výrobu permanentních magnetů [3].

Setkáváme se s tzv. ferimagnetickými látkami (stručně ferity), kde významnou vlastností feritů je jejich malá elektrická vodivost, proto se vyznačují malými ztrátami následkem vířivých proudů, což je v praxi velmi vítané [3].

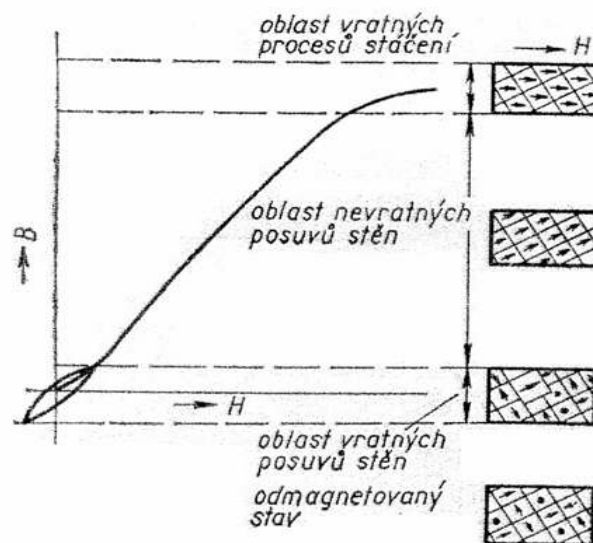


Obr. 2.8: Hysterezní smyčka [3].

2.2.2 Princip metody magnetické skvrny

Atomy železa jsou nositeli výsledného magnetického momentu. Tento moment vznikne složením příspěvku od spinových a orbitálních pohybů. Pod Curieho teplotou dojde u ocelí a litin ke vzniku magnetického uspořádání spojeného se vznikem určitých oblastí, které se s časem nemění, tzv. magnetické domény. Tyto magnetické domény tvoří jakési subzrna ve struktuře materiálu [1].

Polarizací vnějším magnetickým polem dochází k růstu domén posunem tzv. Blochových zón s polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky, obr. 2.9. Nejdříve se orientují domény s blízkou orientací a naposled s opačnou orientací. Výsledkem je jedna magnetická doména, která je orientovaná ve směru vnějšího magnetického pole [1].

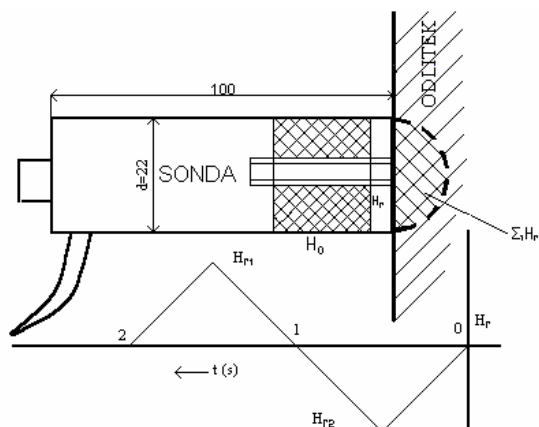


Obr. 2.9: Interakce struktury s vnějším magnetickým polem [1].

Po zániku vnějšího magnetického pole se nevrátí všechny domény do původního stavu. Poruchy krystalové mřížky (dislokace) a překážky (atomy uhlíku, cementit Fe_3C a martenzit) tomuto návratu brání. Vzniká tak remanentní polarizace I_r . Zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r . Proto prvky struktury, které obsahují Fe_3C a martenzit vykazují vysokou remanentní polarizaci I_r . Demagnetizační činitel N charakterizuje vnější i strukturní geometrické poměry rozhraní feromagnetika. Strukturní poměry matrice litin lze proto hodnotit velikostí intenzity zbytkového magnetického pole [2].

$$H_r = H_o - \frac{N \cdot I_r}{\mu} \quad (7)$$

kde: μ – permeabilita [Hm^{-1}], H_o – intenzita vnějšího magnetického pole [Am^{-1}], N – demagnetizační činitel, H_r – intenzita zbytkového magnetického pole [Am^{-1}], I_r – remanentní polarizace [T]



Obr. 2.10: Schéma příložné sondy s Halloým snímačem [2].

Při měření metodou magnetického bodového pólu se nejprve zmagnetizuje povrch zkoušeného materiálu příložnou sondou, obr.2.10, jejíž magnetizační cívka je napájena trojúhelníkovitými impulsy opačné polaritý. Hallův snímač, který je umístěný v ose cívky na povrchu čela sondy, změří intenzitu zbytkového pole měřeného místa po předposledním impulsu, který je kladný. Následuje poslední záporný impuls, po jehož ukončení se opět změří intenzita zbytkového pole měřeného místa. Absolutní součet kladné a záporné intenzity zbytkového pole se ukáže na displeji měřícího přístroje. Tímto způsobem se dosáhne reprodukovatelných hodnot zmagnetování měřeného místa a eliminuje se nepříznivý vliv rušivých magnetických polí [2].

Metody používané v Rusku a České republice se právě zásadně odlišují v charakteristikách magnetizace a tím i v cíli aplikací. V Rusku měří normální gradient H_{rn} po jednosměrné magnetizaci. Přístroje řady DOMENA 1-3 měří absolutní hodnotu H_{rn} jako součet H_{rn} po dvou magnetizačních pulzech opačné polaritý. Snímačem H_r může být Hallova nebo Fösterova sonda. Příspěvek dH_{ri} jednotlivých zrn feromagnetika na výsledné hodnotě H_r závisí na stínícím účinku m a jejich vzdálenosti od snímače [2].

$$H_r = \Sigma m \cdot t_i \cdot dH_{ri} \quad (8)$$

kde: m – stínící účinek, t_i – vzdálenost od snímače [mm]

S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r . V praxi do $t=12\text{mm}$. V tenkých stěnách se tak energie pulsu soustředí do menšího objemu zrn. Hodnota H_r do hodnoty L_{kri} roste podle experimentálně stanoveného modelu [2].

$$H_{r_L} = H_{r_{L12}} \cdot (81 \cdot L^{-3} + 1) \quad (9)$$

kde: L – tloušťka stěny [mm], H_{r_L} – intenzita zbytkového magnetického pole při tloušťce L [Am^{-1}], $H_{r_{L12}}$ – intenzita zbytkového mag. pole pro tloušťku 12mm [Am^{-1}]

Slitiny železa (oceli a litiny) tvoří spektrum nejrozšířenějších konstrukčních materiálů. Feromagnetické vlastnosti lze přiřadit jejich drtivé většině. Znalost hodnot mechanických vlastností v kriticky namáhaném místě u exponovaných dílů převládá nad potřebou integrální informace o vybrané mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů má lokální magnetická strukturoskopie významné postavení ve spektru ostatních metod. Aplikační rozšíření našla ve formě impulsní magnetické kontroly hlavně v Rusku a Čechách [2].

Vysoká produktivita kontroly s cílenou vysokou citlivostí ke kontrolovanému strukturnímu parametru. Kontrola stavu rekrystalizace za studena tvářených výrobků – anizotropie. Měření mechanických vlastností po žíhání. Odlišný způsob měření pro zušlechťení. Eliminace vlivu oddálení – měření přes vrstvy až 3mm tlusté. Přístroje ve výrobních linkách plochých výrobků. V západní Evropě se pro tuto oblast materiálů využívá výhradně metod ET. Střídavé vířivé proudy však popisují více povrchové partie součástí. Pro výrobky ve formě tvářených polotvarů a odlitků s neupravenými povrchy se lépe hodí lokální magnetická strukturoskopie [2].

Přístroj DOMENA B3 umožňuje stanovit a přímo na displeji ukazovat hodnoty tvrdosti, pevnosti, hloubku prokalení. Tedy všech vlastností, které závisí na množství a disperzi magneticky tvrdých strukturních složek jako perlit, cementit, bainit. [2].

Aby přístroj zobrazoval v měřicím režimu přímo hodnotu tvrdosti, je nezbytné před započítím měření vložit do paměti přístroje převodní lineární vztah mezi remanencí M a tvrdostí HB ve tvaru [2]:

$$HB = A \cdot M + B \quad (10)$$

kde: A, B – konstanty získané lineární regresí z dvojic hodnot M – HB naměřených ze souboru alespoň deseti vzorků konkrétního materiálu [-], HB – tvrdost dle Brinella [-], M – intenzita remanentního magnetického pole [Am^{-1}]

Tento vztah je platný pouze pro materiály, u nichž je měřená tloušťka větší než 15 mm.

Převodní vztah mezi remanencí M a tvrdostí HB pro měření na tenké stěně:

$$HB = \frac{A \cdot M_L}{a \cdot L^{-b} + 1} + B \quad (11)$$

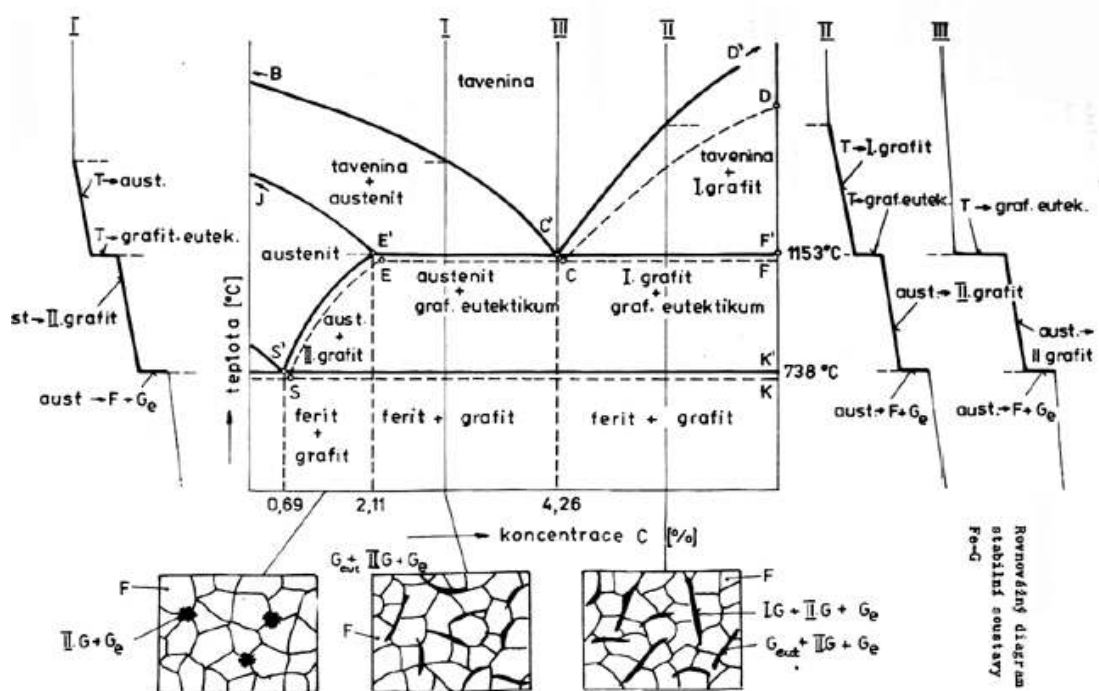
kde: A, B – konstanty [-], HB – tvrdost dle Brinella [-], M_L – intenzita remanentního magnetického pole dané tloušťky [Am^{-1}], L – tloušťka stěny [mm]

Tento vztah je platný pro materiály, kde měřená tloušťka není větší než 15mm [2].

2.3 Litiny

2.3.1 Význam litin

Jako litiny označujeme slitiny železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími prvky (Mn, P, S aj.), u nichž obsah uhlíku převyšuje jeho mezní rozpustnost v austenitu. Vyrábějí se přetavováním surových želez a ocelového odpadu v kuplovnách nebo elektrických pecích (indukčních nebo obloukových). Podle chemického složení a podmínek tuhnutí vzniká buď cementitické eutektikum (bílá litina), nebo grafitické eutektikum (šedá, tvárná litina). Také při dalším ochlazování již ztuhlé litiny se může uplatnit buď stabilní, nebo metastabilní rovnováha. Ve srovnání s ocelí jsou proto litiny slitinami strukturně složitějšími [20].



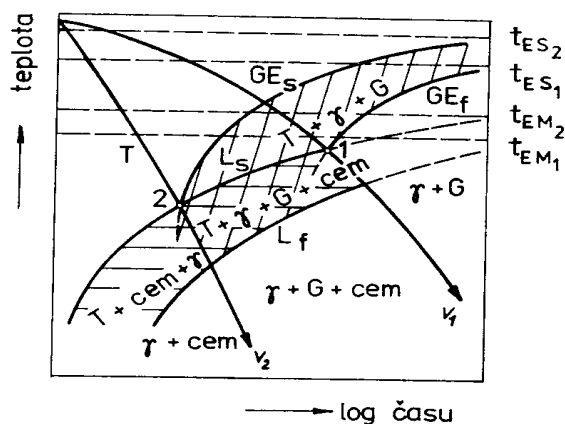
Obr. 2.11: Diagram stabilní soustavy Fe-C [2].

2.3.2 Krystalizace litin

Při výrobě šedé litiny v kuplovně se obvykle dosahuje obsahu uhlíku v rozmezí 2,5 až 3,6%. Snížení obsahu uhlíku pod 2,5% je z provozních důvodů velmi obtížné. Obsah nad 3,6% není vhodný, poněvadž takové litiny mají zpravidla horší mechanické vlastnosti [23].

V litinách je vedle uhlíku nejvýznamnější přísadou křemík, jehož obsah podle druhu litiny může mít poměrně široké rozmezí. U slitin Fe-C-Si s relativně nižším obsahem křemíku (asi 1%) i ostatních přísad (např. u nelegované bílé litiny), se uplatňuje metastabilní rovnováha soustavy Fe-C-Si [20].

Z existence stabilní i metastabilní rovnováhy v soustavách Fe-C i Fe-C-Si vyplývá, že při krystalizaci litiny může vznikat buď grafitické, nebo cementitické eutektikum. Vznik eutektika jednoho nebo druhého typu závisí na chemickém složení litiny a podmínkách tuhnutí. Při určitém chemickém složení je krystalizace litiny významně ovlivněna rychlostí ochlazování taveniny. Vliv tohoto faktoru na průběh krystalizace litiny za podmínek plynulého ochlazování znázorňují kinetické diagramy anizotermické krystalizace [20].



Obr. 2.12: Schéma diagramu anizotropické krystalizace eutektické litiny Fe-C-Si [20].

kde: $t_{ES1}-t_{ES2}$ – teplotní interval tvorby stabilního eutektika, $t_{EM1}-t_{EM2}$ – teplotní interval tvorby metastabilního eutektika, GE_s , GE_f – začátek a konec vzniku grafického eutektika, L_s , L_f – začátek a konec vzniku metastabilního eutektika – ledeburitu.

Při ochlazování taveniny rychlostí menší než v_1 je výsledkem krystalizace pouze grafické eutektikum – vzniká šedá litina. V rozmezí rychlostí ochlazování v_1 až v_2 začíná krystalizace tvorbou grafického eutektika a po dosažení teploty na křivce L_s pokračuje krystalizace vylučováním ledeburitu, které skončí na křivce L_f . Výsledkem krystalizace je směs grafického eutektika a ledeburitu – vzniká maková litina. Při rychlostech ochlazování vyšších než v_2 se vylučuje z taveniny pouze ledeburit – vzniká bílá litina [20].

Hodnoty mezních rychlostí v_1 a v_2 jsou u běžných litin závislé především na obsahu křemíku. S jeho rostoucím obsahem se obě mezní rychlosti zvyšují, tzn. rozšiřuje se interval grafické krystalizace [20]. Při tuhnutí odlitků se nejnáze překročí mezní rychlosti na hranách a tenkých stěnách vlivem zvýšeného odvodu tepla, nedokonalého očkování. Na hranách pak vznikají ledeburitické zákalky, které brání obrábění. K jejich detekci přispívá tato práce.

Krystalizace grafického eutektika začíná tvorbou grafitu na vhodných cizích zárodcích. Růstem částice grafitu se okolní tavenina v jisté vrstvě ochuzuje o uhlík, čímž se vytvoří příznivé podmínky pro vznik druhé fáze eutektika – austenitu [20].

Eutektické buňky rostou poměrně rychle. Lupínky grafitu, jejichž okraje jsou v přímém styku s taveninou, rostou přednostně do délky. Vzniká prostorový útvar, schematicky znázorněný na obr. 2.13 [22].



Obr. 2.13: Prostorové uspořádání lupínků grafitu [19].

Příčný růst lupínků grafitu je brzděn tím, že lupínek je izolován od kapalně fáze krystaly austenitu, které ho obklopují a stěžují difúzi uhlíku z taveniny [22].

Se vzrůstajícím přechlazením taveniny se zvětšuje počet rostoucích eutektických buněk, jejich velikost na konci tuhnutí je menší, a proto také grafit uvnitř buňky naroste do menší délky, postupně se však mění i uspořádání grafitu [20].

Zvláštní druh grafitického eutektika vzniká v tvárné litině. Je výsledkem ovlivnění krystalizace taveniny (očkováním) přísadou hořčíku nebo ceru, popř. jiných prvků. Účinkem očkovadla vzniká zrnitý grafit. Každé zrno je kompaktní kulovitý útvar skládající se z většího množství krystalů, které vyrůstají těsně vedle sebe, radiálně ze společného zárodku (středu eutektické buňky). V určitém stádiu růstu zrna grafitu vzniká austenit, která je zcela obklopí a oddělí od okolní taveniny. Transport uhlíku z taveniny k rostoucímu zrnu grafitu se potom uskutečňuje difúzí atomů uhlíku austenitem. Grafitické eutektikum v tvárné litině se skládá z eutektických buněk, v jejichž středu jsou zrna grafitu. Ve srovnání s šedou litinou je počet eutektických buněk vznikajících při eutektické krystalizaci tvárné litiny výrazně větší. Je důsledkem krystalizace taveniny za většího přechlazení [20].

Krystalizace cementitického eutektika – ledeburitu probíhá při největším přechlazení, kdy je potlačen vznik grafitu. Krystalizace ledeburitu je zahájena tvorbou deskovitých krystalů cementitu jako vedoucí fáze. Tím se sousední tavenina ochuzuje o uhlík a umožní se krystalizace austenitu. Tvorbou austenitu se sousední tavenina naopak obohatí uhlíkem, což usnadní krystalizaci cementitu atd. Vzniká eutektická kolonie krystalů cementitu a austenitu – ledeburit [20].

2.3.3 Rozdělení litin

Základní rozdělení litin vychází ze strukturního hlediska, podle něhož rozlišujeme litiny s cementitickým eutektikem (bílá litina) a grafitickým eutektikem (šedá, tvárná litina). Ke grafitickým litinám náleží také temperovaná litina, jejíž grafit vzniká rozkladem cementitu v tuhém stavu. Za přechodový typ lze považovat tvrzenou litinu, která obsahuje cementitické i grafitické eutektikum [20].

2.3.3.1 Bílá litina

Struktura bílé litiny odpovídá metastabilní rovnováze soustavy Fe-C-Si a je tvořena směsí strukturně volného cementitu (eutektický a sekundární, popř. i primární) a perlitu, který vznikl eutektoidní přeměnou lebeburitického a primárního austenitu. Bílá litina má značnou tvrdost, která vzrůstá se zvyšujícím se podílem cementitu ve struktuře (350 až 500 HB). Vyrábějí se z ní jednoduché odlitky, které mají mít vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení, např. Lopatky pískometu nebo metacích tryskáčů. Převážná část odlitků z nelegované bílé litiny však představuje výchozí produkt k výrobě litiny temperované [20].

2.3.3.2 Temperovaná litina

Temperovaná litina je dosti pevný a houževnatý, dobře obrobitelný konstrukční materiál, vyrobený tepelným zpracováním (temperováním) bílé litiny. Ve stavu po odlití nesmí být ve struktuře odlitku z bílé litiny přítomen grafit, proto stupeň eutektičnosti bývá nízký [20].

Tepelným zpracováním-temperováním dojde k rozpadu cementitu na železo a grafit, který je vyloučen buď z části, nebo úplně v zrnité nebo vločkovité formě jako temperovaný grafit (temperový uhlík).

Temperovanou litinu dělíme podle charakteru lomu a podle mikrostruktury základní hmoty na:

- temperovanou litinu s černým lomem a základní hmotou feritickou nebo perlitickou, z nichž první má nízkou pevnost při dobré houževnatosti, druhá pak vyšší pevnost, ale nižší houževnatosti

- temperovanou litinu s bílým lomem, která je na povrchu výrobku feritická, ale v jádře perlitická

Svémi mechanickými, fyzikálními i technologickými vlastnostmi tvoří temperovaná litina podobně jako litina s kuličkovým grafitem přechod mezi ocelí na odlitky a šedou litinou [21].

2.3.3.3 Grafitické litiny

Struktura grafitických litin je tvořena základní kovovou hmotou (matricí), v níž je přítomen grafit. Vlastnosti těchto litin ovlivňuje jak druh matrice, tak tvar, velikost, množství a rozložení částic grafitu [20].

Grafit se v grafitických litinách může vyskytovat jako lupínkový, pavoučkovitý, červíkovitý, vločkový a nedokonale nebo pravidelně zrnitý. Hodnotí se rovněž velikost a rozložení částic grafitu. Přítomností grafitu v základní kovové hmotě litiny se snižuje efektivní nosný průřez odlitku. Při namáhání odlitku dochází ke vzniku místních koncentrací napětí, jehož špičky mohou (podle geometrie částice) 10krát převýšit hodnotu jmenovitého napětí. Nejsilněji se vrubový účinek grafitu projevuje u šedé litiny, v níž je vyloučen ve tvaru hrubých lupínků. Nejvýhodnější je zrnitý grafit v tvárné litině nebo vločkový grafit v temperované litině, porušuje spojitost matrice nejméně a působí také nejmenším vrubovým účinkem [20].

2.3.3.4 Tvrzená litina

Tvrzená litina není zvlášť normalizovaným druhem litiny. U odlitků z tvrzené litiny se volí chemické složení a způsob ochlazení tak, aby rychle chladnoucí povrch krystalizoval podle soustavy metastabilní – bílé, pomaleji chladnoucí jádro podle soustavy stabilní – šedě. Přejít mezi tvrzenou povrchovou vrstvou a jádrem je tvořen přechodovou (tzv. Makovou) litinou, která obsahuje jak volný cementit, tak grafit. Tyto odlitky potom mají tvrdou povrchovou vrstvu (50 až 55 HRC), která dobře odolává opotřebení a jádro měkké a podstatně méně křehké [21].

Hloubka tvrzené vrstvy závisí na rychlosti odvodu tepla při ochlazování a na chemickém složení litiny. Přísady potlačující grafitizaci hloubku tvrzené vrstvy zvětšují (Mn, W, Mo, Cr), přísady podporující grafitizaci ji naopak zmenšují (C, Si, Ni).

Tvrdość tvrzené vrstvy roste s rostoucím obsahem uhlíku a karbidotvorných prvků. Růst tvrdosti působí i nikl podporující vznik martensiticko-karbidické struktury. Jemná struktury současně zmenšuje nebezpečí praskání vrstvy [21].

2.3.3.5 Legované litiny

Přísadou legujících prvků se sleduje zpravidla dvojí cíl, snahou může být buď zlepšení mechanických vlastností litinových odlitků, nebo dosažení výhodnějších vlastností chemických, fyzikálních a technologických [20].

U grafitických litin převládá snaha zvýšit legováním pevnost a houževnatost (Cr, Mo, Ni, Cu), zlepšit odolnost proti korozi (Si, Cr) nebo zvýšit žárovzdornost (Si, Al, Mo, Cr, Ni). Úpravy chemického složení, jejichž cílem je zvýšení mechanických vlastností grafitických litin, mají význam zejména u litiny tvárné, popř. Temperované, v nichž je grafit vyloučen v příznivém tvaru. U legované bílé litiny, v níž je veškerý uhlík chemicky vázán v podobě legovaného cementitu nebo složitějších karbidů, zvyšují legující prvky (Cr, Mn, V, Mo, Ni). Zejména odolnost proti opotřebení [20].

Poměrně značný počet legovaných litin lze rozdělit do čtyř základních skupin:

- a) litiny se zvýšenými mechanickými vlastnostmi,
- b) litiny odolné proti opotřebení,
- c) litiny žárovzdorné,
- d) litiny korozivzdorné [20].

2.3.3.6 Šedá litina

Šedá litina je vícesložková slitina železa s uhlíkem, křemíkem, manganem, fosforem, sírou a dalšími prvky. Tato grafitická litina se vyznačuje dobrou slévatelností, avšak velmi nízkou plasticitou a houževnatostí, jež souvisí s přítomností lupínkového grafitu v matici (feritické nebo perlitické) těchto slitin. Nejdůležitější přísadou je křemík, jehož obsah v litině závisí na rychlosti chladnutí odlitku, která je dána tloušťkou stěny a rychlosti odvodu tepla formou [23].

Pro koncentraci křemíku a dalších prvků v eutektiku se používá uhlíkový ekvivalent Ce nebo stupeň eutektičnosti Se.

Uhlíkový ekvivalent:

$$C_e = c_C + 0,312 \cdot c_{Si} + 0,275 \cdot c_P \quad (12)$$

Stupeň eutektičnosti S_e :

$$S_e = c_C / [4,23 - 0,3 (c_{Si} + c_P)] \quad (13)$$

kde: c_C , c_{Si} , c_P – jsou hmotnostní koncentrace prvků [hm. %] [19]

Z uvedených vztahů vyplývá, že pevnost i tvrdost šedé litiny se zvyšuje s klesajícím stupněm eutektičnosti S_e avšak současně mají sklon k tvorbě cementitického eutektika a jejich zabíhavost je zhoršena. Pro zvýšení grafitizační schopnosti se taková litina očkuje nejčastěji ferosiliciem (FeSi). Účinkem očkovadla je podněcována krystalizace grafitu, tavenina tuhne při menším přechlazení a výsledkem jsou jemnější lupínky grafitu rovnoměrně rozložené v průřezu odlitku. Ovlivněním krystalizace taveniny se tak získá litina s vyšší pevností – očkovaná šedá litina. Očkuje se tavenina s takovým chemickým složením, při němž by bez očkování ztuhla jako bílá litina [23].

Mechanické vlastnosti šedé litiny jsou nízké, např. pevnost v tahu $R_m = 100 - 350$ MPa, avšak pevnost v tlaku je 3krát až 4krát větší než pevnost v tahu, tažnost $A < 1\%$, tvrdost HBS = 180 až 270, modul pružnosti v tahu $E = 80 - 150$ GPa je ve srovnání s ocelí značně nižší [23].

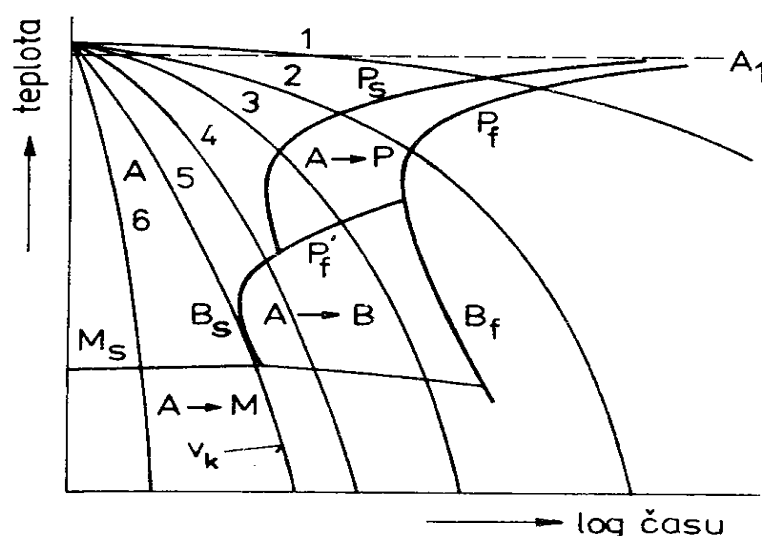
Z šedé litiny se odlévají odlitky součástí strojů textilních a zemědělských, víka, poklopy, části motorů, turbin, kompresorů, částí obráběcích strojů apod. Odolnost šedé litiny proti povětrnostním vlivům je mnohem vyšší nežli korozní odolnost uhlíkové oceli. Očkované šedé litiny (42 2430, 42 4235, 42 2456) jsou určeny pro značně namáhané strojní odlitky, tělesa čerpadel, kluzná ložiska, vačky, šneková kola, vodítka ventilů spalovacích motorů, písty pro hydrauliku apod. [23].

2.4 Ocel

2.4.1 Diagram anizotermického rozpadu austenitu oceli

Diagramy ARA udává počátek a konec jednotlivých přeměn, které byly získány při plynulém ochlazování austenitu různou rychlostí (obr. 2.14). Diagramy ARA jsou složitější, protože výsledná struktura oceli je tvořena směsí produktů přeměn, které

probíhají za různých teplot. Při ochlazování eutektoidní oceli vzniká při určitém přechlazení z austenitu perlit. Počátek a konec perlitické přeměny je posunut k nižším teplotám tím více, čím je rychlost ochlazování větší (křivky 1 a 2). Po dosažení určité ochlazovací rychlosti nestačí všechen austenit transformovat v perlitické oblasti a jeho část se zachová až do teplot, kdy již probíhá přeměna bainitická. Ve struktuře se po takovém ochlazování (křivka 3) objeví spolu s perlitem také bainit (a martenzit). Při určité rychlosti ochlazování začíná rozpad austenitu přímo bainitickou reakcí (křivka 4) a pod M_s pokračuje martenizitickou přeměnou. Se vzrůstající rychlostí ochlazování se podíl martenzitu ve struktuře zvětšuje, až konečně od určité rychlosti ochlazování (křivka 5, popř. v_k) austenit transformuje pouze na martenzit (popřípadě se z části zachová jako zbytkový austenit). Křivka ochlazování označená v_k znázorňuje kritickou rychlosti martenizitické přeměny, je to nejmenší rychlost ochlazování, kdy je výsledná struktura tvořena pouze martenzitem (nevyskytují se produkty difúzního rozpadu austenitu, může však být přítomen zbytkový austenit) [20].



Obr. 2.14: Diagram anizotermického rozpadu austenitu eutektoidní oceli [20].

Vliv přísadových prvků i austenitizačních podmínek je obdobný jako u diagramů IRA. V přítomnosti přísad se však teplotní hystereze zvětšuje, a proto posuv křivek v diagramech ARA (směrem k nižším teplotám a delším časům) je ve srovnání s diagramy IRA u legovaných ocelí větší než u nelegovaných – uhlíkových. Vzhledem k vlivu těchto činitelů na polohu i tvar diagramů obou druhů (IRA, ARA) se u každého

diagramu uvádí: chemické složení, austenitizační teplota, doba setrvání na austenitizační teplotě a velikost zrna austenitu [20].

Transformační diagramy ARA mají značný praktický význam. Slouží jako důležitý podklad při tepelném zpracování oceli. Umožňují optimalizovat postupy tepelného zpracování, účelně volit druh oceli pro dané podmínky provozního namáhání a dokonaleji využít vlastností oceli [20].

Běžné normalizační žíhání probíhá například podle křivky 2. Při intenzivním odvodu tepla v proudícím studeném vzduchu však může na hranách probíhat ochlazování podle křivek 3 až 5 za vzniku směsných technologicky nepříjemných bainitických až martenzitických struktur (martenzitických „zákalek“), k jejichž detekci přispívá tato práce.

2.5 Oduhličení

Oxidací a difuzí za vysokých teplot se ochuzují o uhlík povrchy odlitků a výrobků zejména po žíhání. Vznikají oduhličené vrstvy. Logicky nejtlustší jsou na hranách. Nepříznivě snižují odolnost proti cyklickému namáhání [24, 25].

3 Experimentální část

Cílem experimentů diplomové práce je umožnit měření například tvrdosti na hranách výrobků podobně jako tvrdost na tenkých stěnách o tloušťce L umožňuje vzorec (11); vzorec pro výpočet tvrdosti bude obsahovat podobný matematický model, do něhož se dosadí poloměr hrany R ; rozšířit geometrické meze aplikací metody magnetické skvrny. Sonda přístroje DOMENA musí být při měření vedena vhodným prizmatem vždy tak, aby osa (Hallův snímač) byla v kontaktu s vrcholem hrany.

3.1 Použité vzorky

Pro měření byly použity vzorky s konstantní strukturou. Hranol z litiny s lupínkovým grafitem byl proto vypreparovaný z lože obráběcího stroje.

Ocelový vzorek byl z tyčoviny o rozměru 60 mm. Jednalo se o ocel vhodnou ke zušlechťování. Na hranách vzorků bylo provedeno následné obrábění pro získání požadovaných poloměrů hran - R , na kterých bylo prováděno měření.

3.1.1 Charakteristika použitých materiálů

Specifikace litinového vzorku:

Tab. 3.1: Chemické složení litiny [%].[23].

prvek	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo
obsah prvku v %	3,03	1,49	0,76	0,221	0,127	0,091	0,096	0,02

Při měření byla použita litina o chemickém složení vzorku GLJ250. Struktura vzorku v příloze č.5.

$$Se = c_C / [4,23 - 0,3 (c_{Si} + c_P)] = 3,03 / [4,23 - 0,3 (1,49 + 0,221)] = 0,815$$

Výpočtem Se (uhlíkového ekvivalentu) dle vztahu (13) se jedná o podeutektoidní litinu dle ČSN 42 2430 – stanoveno na základě hodnoty Se v příloze č.3.

Tab. 3.2: Mechanické vlastnosti litiny dle slévárny Rumburk vypočteny z tvrdosti a ultrazvukového měření Lu [mm].

Tvrdost HB	Lu [mm]	L [mm]	Eo [MPa]	Eomin [GPa]	Rm [MPa]
			vypočtené	předepsané	vypočtené
193	105,2	85,5	129163	min 125	255

Specifikace ocelového vzorku:

Jedná se ocel 12 051.1 (stav po normalizačním žití)

Tvrdost 185HB

Tab. 3.3: Chemické složení oceli [%] [27].

prvek	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
obsah prvku v %	0,47-0,55	0,15-0,40	0,50-0,80	max.0,04	max.0,40	max.0,30	max.0,30

3.2 Měření metodou magnetické skvrny

3.2.1 Princip měření

U zkoušeného objektu vzorku materiálu se pomocí magnetovací cívky sondy vytvoří na povrchu objektu magnetická skvrna – tzv. „bodový pól“. Po zániku proudového pulsu v magnetovací cívkce se citlivými snímači měří remanentní intenzita magnetického pole v povrchové a podpovrchové vrstvě materiálu vzorku.

Snímač, Hallova sonda obsahuje dva systémy. Magnetizační cívku, pomocí které se vytváří dostatečně silné magnetické pole vhodného průběhu, pro zmagnetování feromagnetického vzorku pod sondou a snímač intenzity slabého magnetického pole zmagnetizované feromagnetické hmoty vzorku.

Velikost změřené intenzity magnetického pole souvisí se strukturou měřeného materiálu, tím je možné měřit s určitou přesností na feromagnetických materiálech tvrdost, pevnost i hloubku prokalení. Vzájemný vztah mezi sledovanou a měřenou veličinou intenzity magnetického pole, je zapotřebí nejdříve experimentálně stanovit a přístroj překalibrovat.

Výsledky měření ovlivňuje tvar měřeného výrobku a kalibrace vždy platí pro daný výrobek.

3.2.2 Přístroj a pomůcky pro měření

Pro měření struktury a hlavně tvrdosti feromagnetických materiálů pomocí metody magnetického bodového pólu se v ČR používají přenosné bateriové strukturoskopy DOMENA výrobce Elkos Brno, s r.o. (technický popis přístroje typu DOMENA B3 viz. příloha 1).

Popis funkcí pro ovládání přístroje Domena B3:

- přepínač velikosti MAGNETIZACE v 8 stupních
- přepínač FUNKCE s funkcemi A, B, T, TT, L, LL
- klávesnici s dvanácti tlačítky
- čtyřmístný sedmi segmentový zobrazovač LED, výšky 14 mm
- indikační světla PAM, DATA, x, s
- přepínač akumulátorového zdroje VYP, NAB, ZAP
- se dvěma indikačními světly a jedním dvojitým světlem

pro další připojení:

- konektor SND pro kombinovanou sondu
- konektor PC pro připojení počítače
- konektor 230V/60Hz pro připojení vnitřní nabíječky

pro jištění:

- čtyři pojistky [17]

další vybavení přístroje:

- příložná Hallova sonda o průměru 21 mm a délce 100 mm, s tlačítkem na sondě ke spuštění měření
- cejchovní kámen (etalon) pro korekci měřených veličin (většinou tvrdý odlitek litiny, oceli)

Měření probíhalo při nastavení nižší magnetizace M3 a následně při magnetizaci M8. Pro kalibraci sondy byl použit cejchovní kámen s hodnotou $M_c = 200$.

Pro přenos dat do počítače je možné přístroj propojit s počítačem pomocí kabelu, dále je nutné instalovat program pro zpracování přenášených dat, který je dostupný u dodavatele přístroje [17].



Obr. 3.1: Strukturoskop Domena B3 [18].

Reference přístrojů řady Domena uvedeny v příloze č.2.

3.2.3 Popis měření

3.2.3.1 Úprava vzorků

Měření bylo provedeno na vzorku hranolu litiny 42 2430 a ocelovém válečku. Rozměry litinového hranolu: tloušťce 55 mm, šířce 80 mm a délce 185 mm

Rozměry ocelového válečku: průměr 60 mm a tloušťka 40 mm

Na ocelovém válečku musela být ještě vyrobena ostrá hrana (tzn. část plochy se odstranila pomocí strojní pily), tím vznikla hrana vhodná k měření viz obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schéma měření na ocelovém válečku.

V případě litinového vzorku, byly hrany již připraveny a to jak v úhlu 90° , tak i v ostrém úhlu $< 90^\circ$ a tupém úhlu $> 90^\circ$ viz obr. 3.3.



Obr. 3.3: Vzorek litiny dle ČSN 42 2430.

3.2.4 Postup měření

Před každým měřením bylo nutné sondu vždy překalibrovat pomocí cejchovního kamene s hodnotou $Mc = 200$. Následně se sonda přiložila k měřené ostré hraně, pod úhlem 45° viz. obr. 3.2. Sonda byla vedena při měření v přípravku, pro větší přesnost měření. Přípravek byl použit z předcházejících experimentálních měření vzorků kruhových průřezů.



Obr. 3.4: Sonda, cejchovní kámen, přípravek pro vedení sondy.

Pro provedení měření byl přístroj nastaven na stupeň magnetizace M3 a na nejvyšší stupeň M8. Při každé magnetizaci se provedla série měření. Nejdříve na ploše vzorku a následně na ostré hraně vždy čtyři hodnoty po sobě na stejném místě. Přičemž na hraně byl postupně obráběn rádius od poloměru R1 až po R5 a opět se měřily čtyři hodnoty po sobě na stejném místě. Na obr. 3.5 je znázorněn ocelový vzorek se sraženou hranou R5. Po každé sérii měření se vždy přeměřila i sonda – hodnota M0cejh. a překalibrovala vždy znovu pro každé měření.



Obr. 3.5: Konečné sražení ocel. vzorku na poloměr R5.



Obr. 3.6: Konečné sražení u vzorku litiny na poloměr R5.

4 Výsledky a diskuse

4.1 Naměřené hodnoty a grafy

Měření probíhalo při dvou magnetizacích, při M3 - nižší a při vyšší magnetizaci M8.

4.1.1 Výsledné hodnoty pro litinový vzorek

K měření byl použit vzorek šedé litiny s lupínkovitým grafitem, svým složením se řadí mezi podeutektické litiny, které bývají náchylnější ke vzniku karbidů, zákalce na hranách a rozích výrobků v závislosti na chemickém složení a rychlosti ochlazování. U tohoto vzorku byla již dříve ověřena stálost struktury, bez nežádoucích vlivů karbidů.

Magnetizace M3:

R - postupně zvětšovaný poloměr měření až do max. R5 mm

M1, M2, M3, M4 - naměřené hodnoty zbytkové intenzity mag. pole [A/m] na vzorku

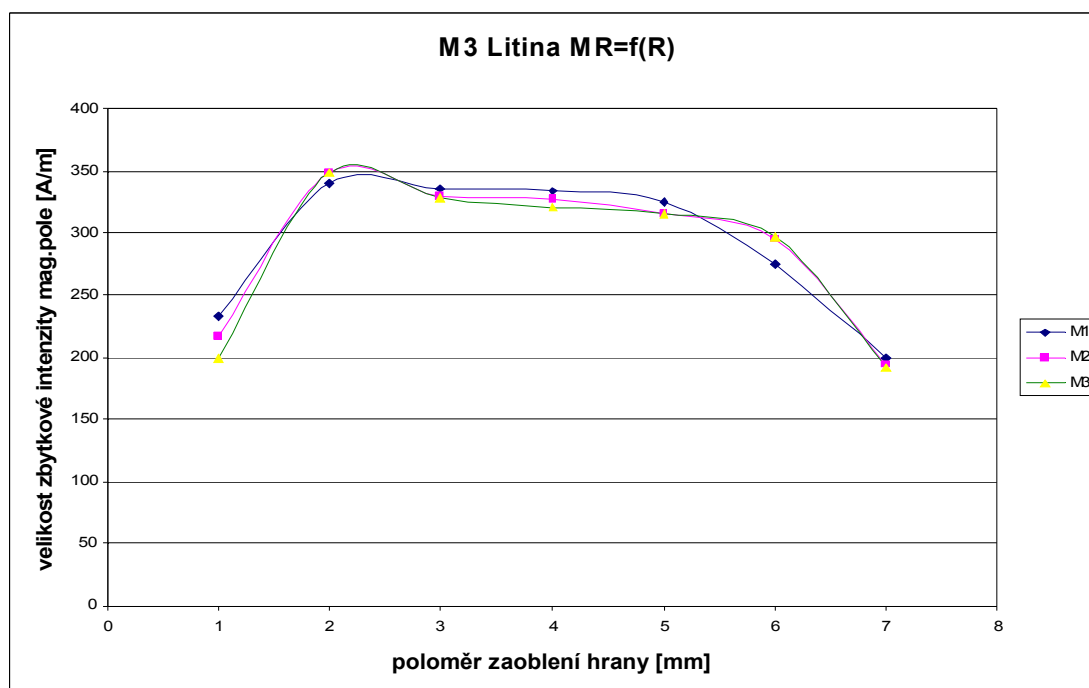
M0cejh - hodnota sondy přeměřené na kalibru

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty.

R	M1	M2	M3	M4	M0cejh
0	233	223	215	212	212
1	340	349	348	348	197
2	336	329	323	328	197
3	334	330	330	331	206
4	325	315	321	315	202
5	274	289	287	285	192
∞	200	194	192	192	198

Tab. 4.2: Tabulka obsahuje již korigované hodnoty.

R	M1	M2	M3
0	233	217	200
1	340	349	348
2	336	329	328
3	334	327	321
4	325	315	315
5	274	295	297
∞	200	194	192



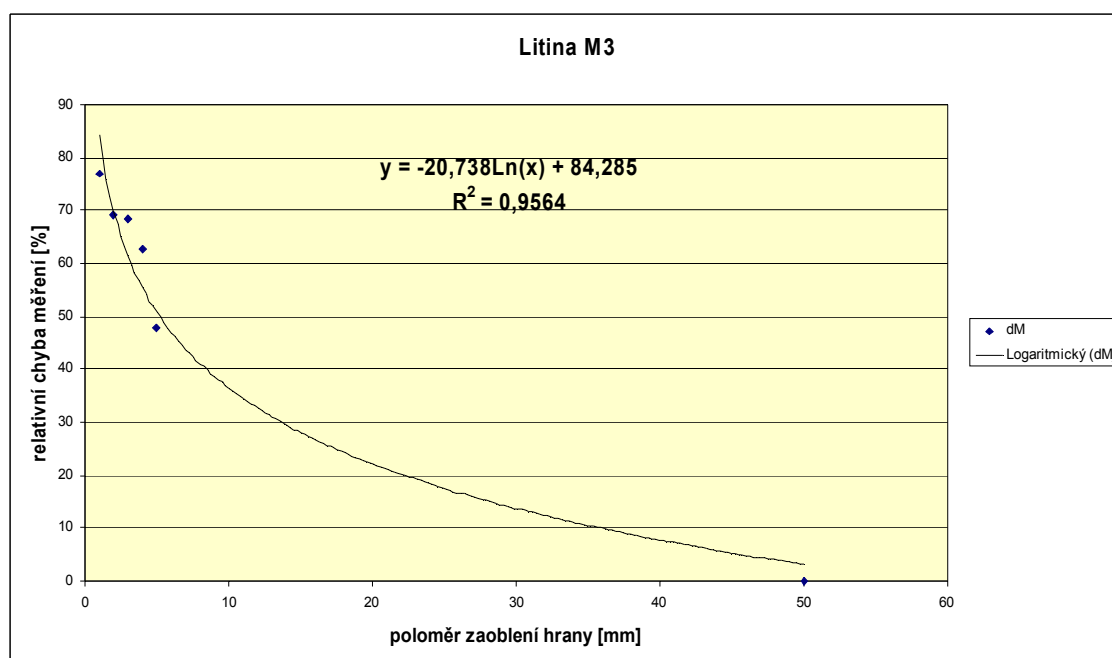
Graf č. 1: Graf závislosti naměřené hodnoty zbytkového magnetismu na velikosti poloměru R.

Výsledná relativní odchylka δM v % v tab. 4.3 korigované střední hodnoty (viz. tab. 4.1 a 4.2) intenzity zbytkového magnetického pole M od hodnoty M na ploše na hraně se zaoblením od 1 mm. Nekonečné zaoblení R rovné plochy nahrazeno zaoblením R 50 mm. V intervalu zaoblení R 0-1 mm hrany hodnota M klesá, nelze použít pro aproximaci nezbytnou monotónní funkci.

Tab. 4.3: Výsledná chyba měření δM v %.

R	δM
1	77
2	69,1
3	68,5
4	62,8
5	47,9
50	0

Výsledný vztah při M3 z grafu



Graf č. 2: Výsledný graf pro M3.

$$\delta M = 100 \cdot (M_R - M_{r50}) / M_{r50} = \underline{84,3 - 20,73 \cdot \ln R} \quad [\%] \quad (14)$$

Magnetizace M8:

R . postupně zvětšovaný poloměr měření až do max. R5 mm

M1, M2, M3, M4 - naměřené hodnoty zbytkové intenzity mag. pole [A/m] na vzorku

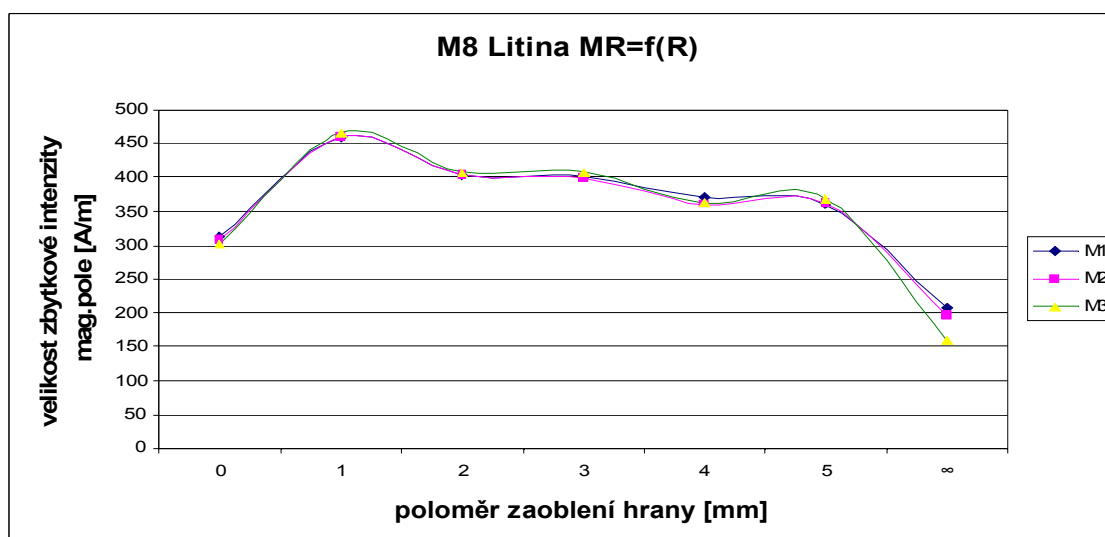
M0cejch - hodnota sondy přeměřené na kalibru

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty.

R	M1	M2	M3	M4	M0cejch.
0	313	309	303	301	202
1	460	459	461	465	200
2	402	404	403	407	202
3	401	390	389	389	191
4	371	360	362	362	202
5	360	356	358	360	195
∞	207	197	196	192	201

Tab. 4.5: Tabulka obsahuje již korigované hodnoty.

R	M1	M2	M3
0	313	309	301
1	460	459	465
2	402	404	407
3	401	398	407
4	371	360	362
5	360	361	369
∞	207	197	159



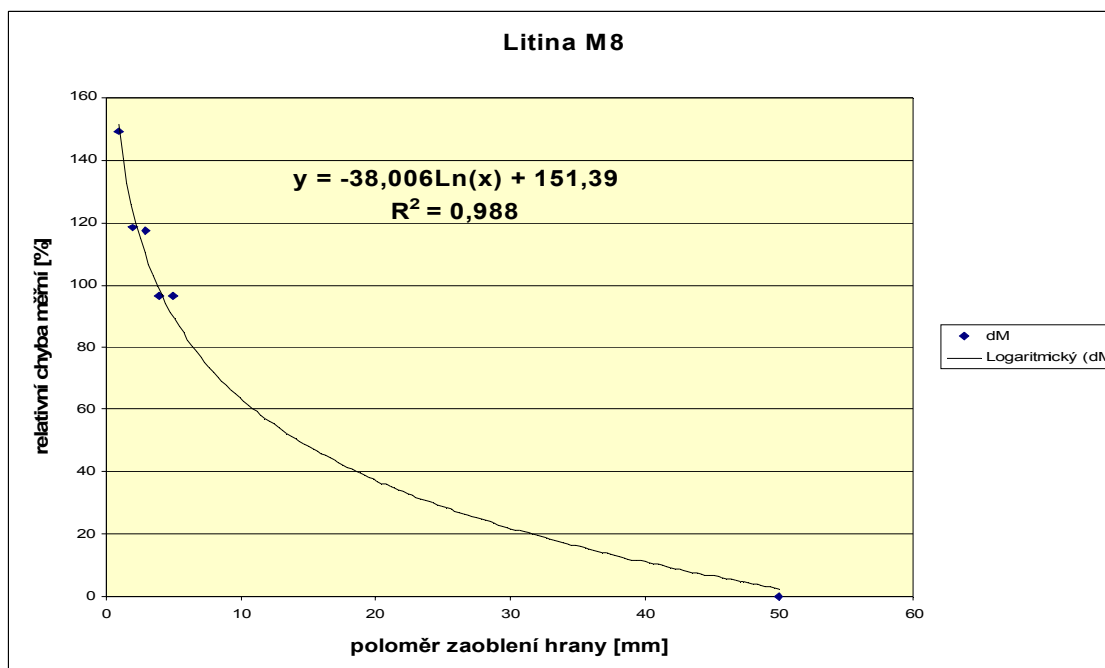
Graf č. 3: Graf závislosti naměřené hodnoty zbytkového magnetismu na velikosti poloměru R.

Výsledná relativní odchylka δM v % v tab. 4.6 korigované střední hodnoty (viz. tab. 4.4 a 4.5) intenzity zbytkového magnetického pole M od hodnoty M na ploše na hraně se zaoblením od 1 mm. Nekonečné zaoblení R rovné plochy nahrazeno zaoblením R 50 mm. V intervalu zaoblení R 0-1 mm hrany hodnota M klesá, nelze použít pro aproximaci nezbytnou monotónní funkci.

Tab. 4.6: Výsledná chyba měření δM v %.

R	δM
1	149,2
2	118,4
3	117,2
4	96,5
5	96,4
50	0

Výsledný vztah při M8:



Graf č. 4: Výsledný graf pro M8.

$$\delta M = 100.(M_R - M_{r50})/M_{r50} = \underline{151,4 - 38,006.\ln} \quad [\%] \quad (15)$$

4.1.2 Výsledné hodnoty pro ocelový vzorek

Pro měření byl použit váleček oceli s předepsaným tepelným zpracováním - normalizačním žíháním.

Magnetizace M3:

R - postupně zvětšovaný poloměr měření až do max. R5 mm

M1, M2, M3, M4 - naměřené hodnoty zbytkové intenzity mag. pole [A/m] na vzorku

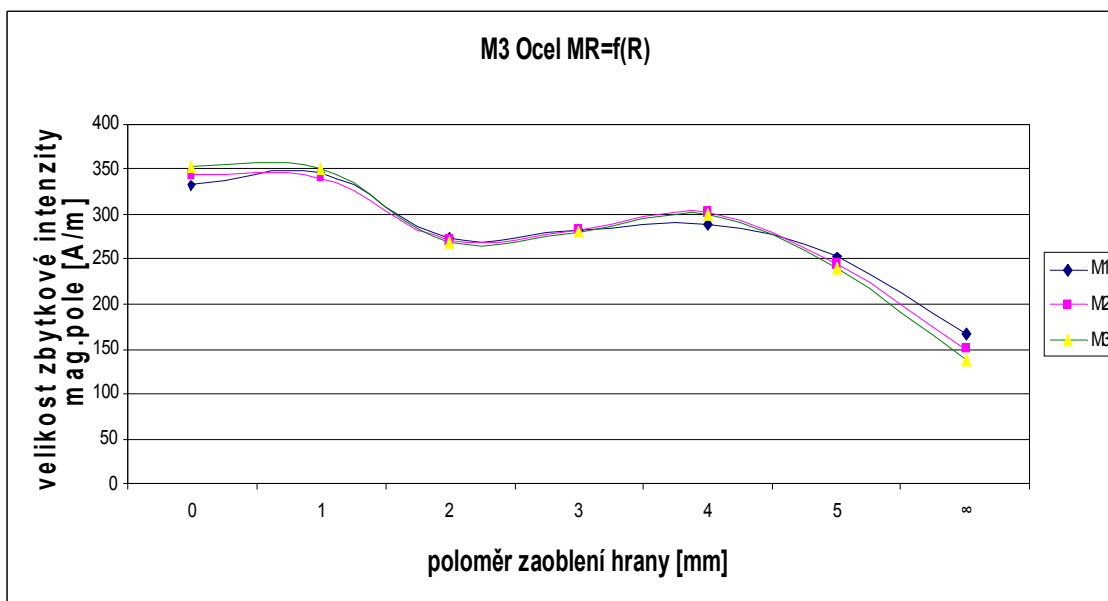
M0cejh - hodnota sondy přeměřené na kalibru

Tab. 4.7: Naměřené hodnoty.

R	M1	M2	M3	M4	M0cejh
0	332	337	341	335	190
1	347	337	332	332	195
2	272	271	271	268	203
3	283	283	282	281	196
4	289	301	300	299	198
5	253	247	243	246	206
∞	166	149	136	137	202

Tab. 4.8: Tabulka obsahuje již korigované hodnoty.

R	M1	M2	M3
0	332	344	353
1	347	341	350
2	272	271	268
3	283	283	281
4	289	301	299
5	253	245	239
∞	166	149	137

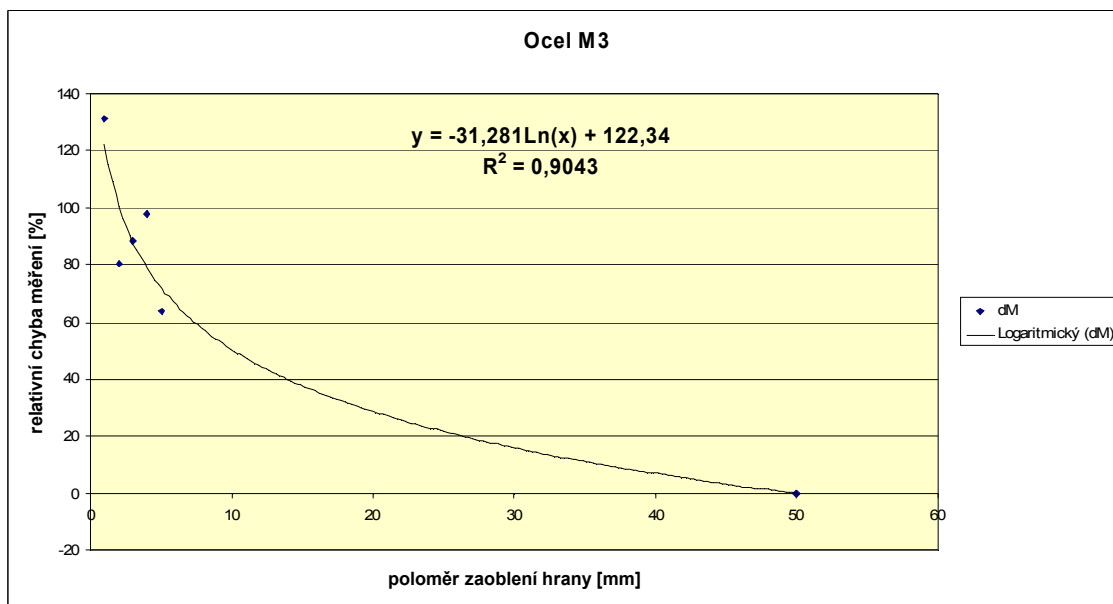


Graf č. 3.5 Graf závislosti naměřené hodnoty zbyt. magnetismu na vel. poloměru R.

Výsledná relativní odchylka δM v % v tab. 4.9 korigované střední hodnoty (viz. tab. 4.7 a 4.8) intenzity zbytkového magnetického pole M od hodnoty M na ploše na hraně se zaoblením od 1 mm. Nekonečné zaoblení R rovné plochy nahrazeno zaoblením R 50 mm. V intervalu zaoblení R 0-1 mm hrany hodnota M klesá, nelze použít pro aproximaci nezbytnou monotónní funkcí.

Tab. 4.9: Výsledná chyba měření δM v %.

R	δM
1	131,1
2	80,4
3	88,5
4	98,1
5	63,8
50	0



Graf č. 6: Výsledný graf pro M3.

$$\delta M = 100 \cdot (MR - Mr50) / Mr50 = \underline{122,34 - 31,281 \ln R} \quad [\%] \quad (16)$$

Magnetizace M8:

R - postupně zvětšovaný poloměr měření až do max. R5 mm

M1, M2, M3, M4 - naměřené hodnoty zbytkové intenzity mag. pole [A/m] na vzorku

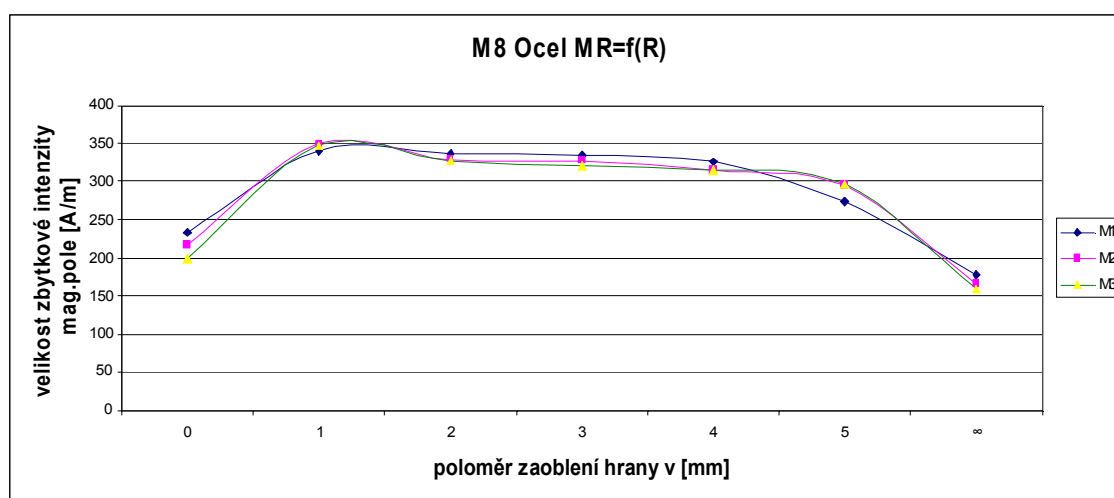
M0cejch - hodnota sondy přeměřené na kalibru

Tab. 4.10: Naměřené hodnoty.

R	M1	M2	M3	M4	M0cejch
0	406	403	406	411	186
1	312	310	312	309	200
2	410	408	404	402	200
3	365	365	373	380	197
4	358	358	359	358	190
5	324	324	324	324	198
∞	182	179	176	176	195

Tab. 4.11: Tabulka obsahuje již korigované hodnoty.

R	M1	M2	M3
0	233	217	200
1	340	349	348
2	336	329	328
3	334	327	321
4	325	315	315
5	274	295	297
∞	178	167	159

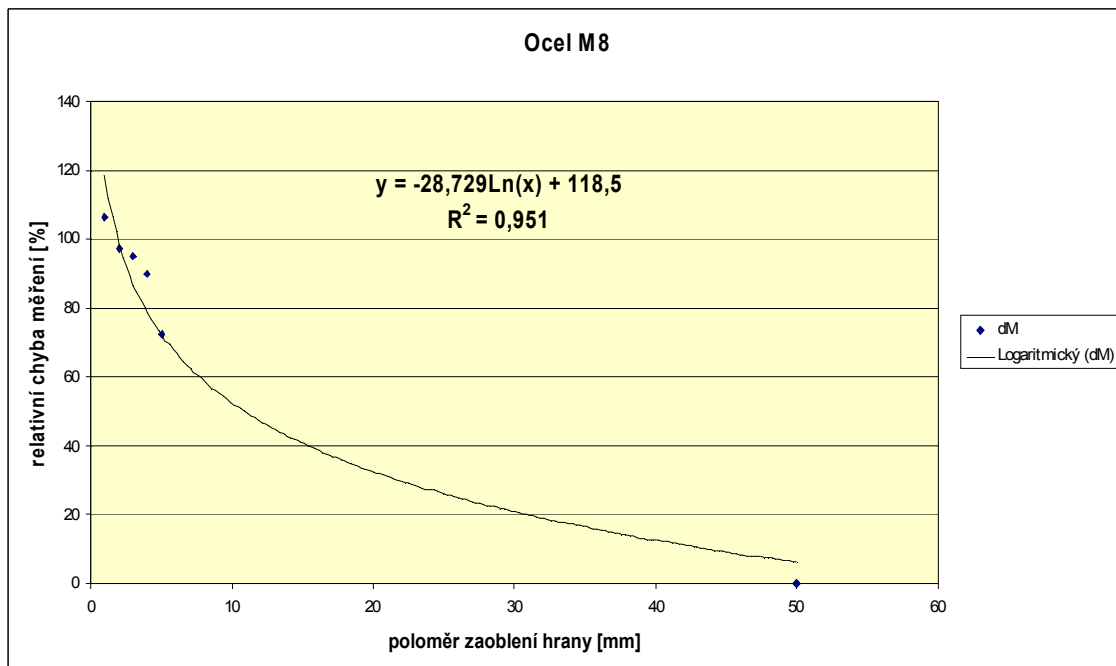


Graf č. 7: Graf závislosti naměřené hodnoty zbytk. magnetismu na vel. poloměru R.

Výsledná relativní odchylka δM v % v tab. 4.12 korigované střední hodnoty (viz. tab. 4.11 a 4.10) intenzity zbytkového magnetického pole M od hodnoty M na ploše na hraně se zaoblením od 1 mm. Nekonečné zaoblení R rovné plochy nahrazeno zaoblením R 50 mm. V intervalu zaoblení R 0-1 mm hrany hodnota M klesá, nelze použít pro aproximaci nezbytnou monotónní funkcí.

Tab. 4.12: Výsledná chyba měření δM v %

R	δM
1	106,3
2	97,4
3	95,1
4	89,8
5	72,5
50	0



Graf č. 8: Výsledný graf pro M8.

$$\underline{\delta M} = 100 \cdot (MR - Mr50) / Mr50 = \underline{118,5 - 28,729 \ln R} \quad [\%] \quad (17)$$

4.2 Diskuse výsledků

Při měření na ostré hraně o poloměru R_0 až R_1 vykazují naměřené hodnoty pokles. Tento interval bude nutno prozkoumat, určit skutečný poloměr R maxima intenzity zbytkového magnetického pole M na hraně. Identifikaci hranových zákalek a oduhličení bude možno provádět od poloměru hrany RM_{max} . K praktickým výpočtům lze použít monotónní funkce (o jednom řešení).

Univerzální vzorec jako pro korekci intenzity zbytkového mag. pole M na tenkých stěnách L nebude možno použít. Tvarem se jednotlivé vzorce $\delta M = f(R)$ výrazně liší. Všechny grafy a výpočty jsou obsaženy v příloze č. 4. Doporučuji ještě vytvořit matematické modely pro litinu s kuličkovým grafitem. Každá litina a ocel bude mít svůj vzorec.

Pro přesnou kvantifikaci podílu zákalky na hranách navrhuji provést měření na plochých vzorcích s hranou z ledeburitické litiny a zakalené oceli 12 051, feritické oceli (simulace oduhličení).

Pro případné navazující diplomové práce, bych doporučila: ještě provést výzkum změn hodnot M na podstatně ostřejší hraně, jak 90° tak i např. na 45° a zároveň porovnat matematické modely.

Změnami M pro poloměry nad R_5 mm se zabývá paralelně řešená práce bakaláře Žáčka. Na základě jejích výsledků bude možno přesněji definovat hodnotu dM i pro R_{25} , R_{50} a vypočítat věrohodnější model.

5 Závěr

Metoda magnetického bodového pólu se začíná postupně osvědčovat a rostou i zkušenosti s měřením. Samotné měření na přístroji Domena B3 je snadné a po krátkém školení jej zvládne i méně zručný uživatel. Je rychlé a dosahuje spolehlivé výsledky.

Cílem této práce bylo prozkoumat vliv zakřivení odlitku (různé úhly přiložení sondy, poloměry hrany) na měřené hodnoty. Tento postup je přirozeným krokem v rozvoji uvedené metody a navazuje na dlouholetý výzkum.

Při měření na ostré hraně o poloměru R_0 až R_1 vykazují naměřené hodnoty pokles. Geometrické zkreslení hodnoty M magnetické skvrny pro poloměry od R 1mm pro litinu a ocel, slabou a silnou magnetizaci popisují matematické modely (logaritmické funkce) z grafů č. 2, 4, 6, 8. Při měření přístroji DOMENA na hranách o poloměrech od R 1mm se zákalkami bude dosahováno vyšších hodnot než predikují uvedené vzorce. Při měření na hranách oduhličených naopak bude dosahováno nižších hodnot M .

K přesné kvantifikaci podílu ledeburitu (litiny) či směsi bainitu s martenzitem (ocel) nutno uskutečnit ještě výzkum. Další výzkum se rovněž musí věnovat změnám intenzity magnetického pole v intervalu zaoblení hran R od 0 do 1 mm.

6 Použitá literatura

- [1] Dočekal, J.: Elektromagnetická strukturoskopie grafitických litin a podobně disperzních kovových materiálů. [teze disertační práce] TU Liberec, 2008. ISBN 978-80-7372-368-2.
- [2] Dočekal, J.: Elektromagnetická strukturoskopie grafitických litin a podobně disperzních kovových materiálů. [online] 2008[cit. 2014-4-21].
https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/6698/dr_16500.pdf
- [3] Dostupné z: <http://kf-lin.elf.stuba.sk/KrempaskyFyzika/42.pdf> [cit. 2014-1-11]
- [4] Dostupné z: http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/3_10_Magneticke_vlastnosti.pdf [cit. 2014-4-17].
- [5] Encyklopedie fyziky [online] 2006-2014 [cit. 2014-4-13].
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [6] Dostupné z:
http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139403/PokrokyMFA_04-1959-5_3.pdf [cit. 2014-1-11].
- [7] Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [8] Kníř, J. : Nedestruktivní metody kontroly vybraných dílů letadla. [online] [cit. 2014-5-18].Dostupné z:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/11949/Nedestruktivn%C3%AD_metody_kontroly_vybran%C3%BDch_d%C3%ADl%C5%AF_letadla.pdf?sequence=2
- [9] Dostupné z : http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/kapilarni_zkousky.pdf
[cit. 2014-5-18].
- [10] Dostupné z:
<http://www.ndt.net/article/defektoskopie2010/proceedings/029%20Dvo.pdf>
[cit. 2014-2-2]
- [11] Preditest, Akustická emise obecně. [online] 2011 [cit. 2014-5-19]
Dostupné z: <http://www.preditest.cz/?i=351/ke-stazeni>
- [12] ATG s.r.o. [online] [cit. 2014-5-19]. Dostupné z:
http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/ET/prehledovy_katalog_vyroby_a_sluzeb_pro_et.pdf?PHPSESSID=43e3c18b30b73445a8f0e19342240d7c
- [13] Dostupné z : <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/DZM/2013%20->

- %20DZM%2004%20V%C3%8D%C5%98IV%C3%89%20PROUDY.pdf
[cit. 2014-5-19].
- [14] Dostupné : http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_ultrazvukem.pdf
[cit. 2014-5-18].
- [15] Dostupné z : <http://cz7asm.wz.cz/fyz/index.php?page=renzar> [cit. 2014-5-21]
- [16] ConVerter [online] 2002 [cit.2014-5-21]. Dostupné z :
<http://www.converter.cz/prevody/teplota.htm>
- [17] Elkoso, spol.s r.o.,: Přenosný bateriový strukturoskop tzp Domena B3.B. 2003.
Technický popis a návod k obsluze DOMENA 3. [cit 2014-5-20].
- [18] Dostupné z : http://www.ndt.net/article/defektoskopie2011/papers/155_p.pdf
[cit 2014-2-24].
- [19] Plachý, J., Němec,M. : Teorie slévání. [skripta]. ČVUT Praha.1990. s.20-21.
- [20] Pluhař, j. : Nauka o materiálech. SNTL Praha. 1989.s.392-399, 409-411.
- [21] Dostupné z : http://www.ndt.net/article/defektoskopie2011/papers/155_p.pdf
[cit.2014-3-22].
- [22] Pluhař,J., Koritta.J. : Strojírenské materiály. SNTL Praha. 1977. s.381
- [23] Spektrometrická laboratoř, Metalurgie Rbk spol s r.o. 29.10.2010
[cit. 2014-5-14].
- [24] Skrbek, Tomáš. NDT characterization of decarburization of steel after long-time annealing. Metal Mater. Vol.49/2011, p. 401 – 407.
- [25] Skrbek, Pospíšil, Nosek. Úpravy a charakteristika oduhličených povrchů odlitků. Technológ, vol.2/2010, p.199-203. ISSN 1337-8996.
- [26] Skrbek, Bílek. Application of Ultrasound and Magnetic Methods of Nondestructive for Strength Determination of Graphite Část Irons Using TELIT Structuroscope. Hutnické listy vol.63/2010, No.5, p 63-66. ISSN 0018-8069
- [27] Dostupné z : <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12051.pdf> [cit. 2014-5-28]

7 Seznam příloh

Příloha č. 1 Technický popis a návod k obsluze – strukturoskop DOMENA B3.B

Příloha č. 2 Reference přístrojů řady DOMENA k 2013-11-03

Příloha č. 3 Závislost mech. vlastností šedých litin na tloušťce stěn odlitků

Příloha č. 4 Grafy a výpočty

Příloha č. 5 Metalografické hodnocení struktury litiny

Příloha č.1 – Technický popis a návod k obsluze – strukturoskop DOMENA B3.B

ELKOSO, spol. s r.o.
614 00 Brno, Obřanská 60, CZ

Tel.: +420 545215854
Fax: +420 545215874
E-mail: elkoso@elkoso.cz

Přenosný bateriový strukturoskop

typ

DOMENA - B3.B

Technický popis a návod k obsluze

Není určeno k publikování.

BRNO 2003

Návod k obsluze přístroje DOMENA-B3

Přístroj má pro ovládání k dispozici

- přepínač velikosti MAGNETIZACE v 8 stupních
- přepínač FUNKCE s funkcemi A,B,T,TT,L,LL
- klávesnici s dvanácti tlačítky
- čtyřmístný sedmísegmentový zobrazovač LED, výšky 14mm
- indikační světla PAM,DATA,x,s
- přepínač akumulátorového zdroje VYP,NAB,ZAP
se dvěma indikačními světly a jedním dvojitým světlem
- tlačítko START na sondě

pro další připojení

- konektor SND pro kombinovanou sondu
- konektor PC pro připojení počítače
- konektor 230V/60Hz pro připojení vnitřní nabíječky

pro jištění

- čtyři pojistky.

Uvedení do chodu.

Připojíme kombinovanou sondu do konektoru SND. Přepínač akumulátorového zdroje přepneme z polohy VYP do polohy ZAP, rozsvítí se zobrazovač. Nerozsvítí-li se dvojitě indikační světlo NAB, jsou akumulátory v pořádku. Nyní se přesvědčíme o nastavených konstantách po zapnutí přístroje. V poloze přepínače funkce

A	bude na zobrazovači hodnota	1.00
B	bude na zobrazovači hodnota	000
T	bude na zobrazovači hodnota	1.00
TT	bude na zobrazovači hodnota	1.00
L	bude na zobrazovači hodnota	000
LL	bude na zobrazovači hodnota	000

Přepínačem MAGNETIZACE nastavíme vhodný stupeň magnetizace vzorku. Požadujeme-li přenos do počítače, propojíme přístroj s počítačem kabelem, který zastrčíme do konektoru PC na přístroji a druhý konec zastrčíme do příslušného konektoru v počítači. Počítač musí obsahovat program pro zpracování přenášených dat. (Poznámka - program nutno objednat u dodavatele tohoto přístroje).

Nastavení konstanty A.

Přepínač FUNKCE dáme do polohy A a na zobrazovači se zobrazí vždy nastavená konstanta A v rozsahu +/- 0,01 až 999, ale po zapnutí to bude 1,00. Pomocí klávesnice je možno konstantu změnit takto. Stiskneme postupně klávesy jednotlivých číslic.

Na displeji se číslice mění postupně zprava doleva. Postupným stiskem klávesy *, nastavíme správnou polohu desetinné tečky. Opětovným stiskem klávesy # nastavíme kladné, nebo záporné číslo. Volbu konstanty potvrdíme stiskem klávesy D a nyní přepínač FUNKCE je obsluze k dispozici. Takto můžeme konstantu kdykoli změnit. Po přepnutí přepínače akumulátorového zdroje do polohy NAB, nebo VYP se nastavení konstanty zruší.

Nastavení konstanty B.

Přepínač FUNKCE dáme do polohy B a na zobrazovači se zobrazí vždy nastavená konstanta B v rozsahu +/- 10,0 až 999, ale po zapnutí to bude 000. Pomocí klávesnice je možno konstantu změnit takto. Stiskneme postupně číslicové klávesy, číslice se mění postupně zprava doleva. Postupným stiskem klávesy *, nastavíme správnou polohu desetinné tečky. Opětovným stiskem klávesy # nastavíme kladné, nebo záporné číslo. Volbu konstanty potvrdíme stiskem klávesy D a nyní přepínač FUNKCE je obsluze k dispozici. Takto můžeme konstantu kdykoli změnit. Po přepnutí přepínače akumulátorového zdroje do polohy NAB, nebo VYP se nastavení konstanty zruší. Pokud při potvrzení konstanty se objeví chybové hlášení (viz seznam chybových hlášení) je konstanta nesprávně nastavena.

Korekce měřené hodnoty.

Protože po čase se může citlivost sondy změnit a výsledky měření by neodpovídaly kalibraci přístroje, je možné pomocí funkce TEST, nebo TEST LOW (pětinásobná magnetizace) provést korekci takto. Přepínač FUNKCE přepneme do polohy T, nebo TT (TEST LOW). Na zobrazovači se zobrazí vnitřní konstanta "a", která je po zapnutí přístroje nastavena na 1,00. Korekci provedeme měřením na etalonu o známé hodnotě M pro danou fyzikální hodnotu. Tedy po přepnutí přepínače FUNKCE do polohy T, nebo TT a nastavíme pomocí klávesnice známou hodnotu M již popsáním způsobem a nastavení potvrdíme klávesou D. Na zobrazovači se objeví znak C a nula úplně vpravo. Nyní přiložíme sondu na etalon a stiskneme tlačítko START na sondě. Začne se provádět měření a úplně vpravo na zobrazovači se ukazuje počet magnetizačních kroků a na konec se zobrazí nová hodnota vnitřní konstanty "a" stanovená podle vztahu

$$a = M / m$$

kde "m" je hodnota magnetizace pro $a = 1,00$. Po přepnutí přepínače akumulátorového zdroje do polohy NAB, nebo VYP se nastavení konstanty zruší. Nesouhlasíme-li s nastavenou konstantou, stlačíme klávesu D a nastavíme znovu známou hodnotu M a měření opakujeme. Pokud nám stanovení vnitřní konstanty vyhovuje, stačí přepnout přepínač FUNKCE do jiné polohy a vnitřní konstanta "a" je uchována v paměti. Přístroj rozlišuje dvě vnitřní konstanty pro funkci TEST a TEST LOW. (Poznámka - je-li zobrazena hodnota "a" bez desetinné tečky, míní se tím hodnota 0,xxx - tedy tisíckrát menší.)

Měření.

Po nastavení konstant A,B a případně "a" můžeme začít měřit. Lze zvolit dva režimy LINEAR a LINEAR LOW, kdy vzorek je magnetizován pětkrát (pomalu). Změřená hodnota zbytkového magnetizmu "m" je násobena příslušnou vnitřní konstantou "a", tak že platí vztah

$$M = m * a$$

Po zapnutí přístroje je vnitřní konstanta nastavena na hodnotu 1,00 a tedy platí

$$M = m$$

Po přepnutí přepínače FUNKCE do polohy L, nebo LL se na zobrazovači objeví hodnota posledního měření, nebo po zapnutí přístroje hodnota 000. Nyní přiložíme sondu k měřenému vzorku a stiskneme tlačítko START na sondě. Na zobrazovači se objeví znak C a úplně vpravo počet magnetizačních kroků a nakonec se zobrazí údaj

$$Y = A * M + B$$

kteřý odpovídá hodnotě v daných jednotkách, podle kalibrační přímky s odpovídajícími konstantami A a B.

Volba konstant A a B je dána kalibrací přístroje pomocí souboru vzorků známých hodnot. Takto je možno přístroj okalibrovat tak, aby měřil tvrdost, pevnost, nebo hloubku prokalení v příslušných jednotkách. To pak zjednodušuje interpretaci změřených výsledků.

Funkce tlačítek.

A

stiskem tohoto tlačítka rozsvítí se světlo PAM a od tohoto okamžiku jsou měřené hodnoty Y ukládány do paměti. Opětovné stlačení tohoto tlačítka ukládání zrušíme a světlo PAM zhasne. Paměť umožňuje zapsat maximálně 100 hodnot. Přeplnění paměti je oznámeno chybovým hlášením, které nedopustí zničení již naměřených hodnot.

B

stiskem tohoto tlačítka přenáší se obsah paměti do připojeného počítače a bliká světlo DATA.

C

stiskem tohoto tlačítka zobrazí se na tři vteřiny průměr z nenulového obsahu paměti, svítí světlo x a na další tři vteřiny velikost směrodatné odchylky z téhož souboru dat a svítí světlo s. Potom se na zobrazovači objeví původní hodnota před stiskem tohoto tlačítka.

Nabíjení akumulátorů.

Při každém použití přístroje kontrolujeme stav akumulátorů tím, že sledujeme rudou dvojitou kontrolku NAB pro oba akumulátory. Jakmile se kontrolka trvale rozsvítí, znamená to že příslušný akumulátor je již vybitý a nutno akumulátory nabít. Pokud při měření problikává, ukazuje to na částečné vybití příslušného akumulátoru, ale přístroj je stále funkční.

POZOR při přepnutí přepínače do polohy VYP, nebo NAB z polohy ZAP odpojíme přístroj od zdroje a paměť se vymaže.

Nabíjení provedeme tak, že přepínač dáme do polohy VYP, do konektoru 220V vzadu zasuneme kabel a druhý konec zapojíme do sítě. Přepínač přepneme do polohy NAB. V tomto okamžiku rozsvítí se rudá světla AKU1, AKU2 signalizující nabíjení akumulátorů. Jakmile se rudé světlo změní v zelené je nabíjení příslušného akumulátoru ukončeno a akumulátor je dobýjen jen udržovacím proudem. Nabíjení ukončíme odpojením od sítě.

Při nabíjení přepínač ponecháme v poloze NAB. Pokud tak neučiníme rozsvítí se obě zelená světla a nabíjení se přeruší. Chceme-li pokračovat v nabíjení, musíme přerušit síťové napájení a postupovat znovu.

Dvojitě kontrolní světlo NAB kontroluje stav akumulátorů v poloze přepínače ZAP. V tomto provedení přístroje lze akumulátory vyjmout a nahradit čerstvě nabitými a tak prodloužit funkci přístroje.

Energii šetříte, když zvolený stupeň magnetizace je malý.

Poznámka.

Chybové hlášení E xx , zrušíte stlačením klávesy D a na zobrazovači se objeví poslední platný výsledek.

Po přepnutí přepínače akumulátorového zdroje do polohy NAB, nebo VYP se obsah paměti zruší.

Velikost pojistek.

Pojistka vzadu	0,4 A
Pojistka u AKU1	5,0 A
Pojistka u AKU2	5,0 A
Pojistka u NAB	1,0 A

Přehled chybových hlášení:

- Err 11 při kalibraci malá změřená hodnota standardu,
musí být vyšší než 100
- Err 12 přetečení při výpočtu korekční konstanty C nebo D,
v praxi nemůže nastat
- Err 13 přetečení při výpočtu Z,
Z je větší než 6500
- Err 14 přetečení při výpočtu $A \cdot Z$,
součin $A \cdot Z$ je větší než 6500
- Err 15 překročení hodnoty součinu $A \cdot Z$,
součin $A \cdot Z$ je větší než 2000
- Err 16 překročení minimální hodnoty Y,
výsledek Y je menší než 0
- Err 17 překročení maximální hodnoty Y,
výsledek Y je větší než 1000
- Err 18 chybné zadání konstanty B,
B má více desetinných míst
- Err 19 chybné zadání standardu T_0 ,
 T_0 má více des. míst nebo je menší než 0
- Err 30 při výpočtu průměru dělení nulou,
prázdná paměť, $n=0$
- Err 31 při výpočtu sm.odchylky dělení nulou,
málo prvků, $n=1$
- Err 32 při výpočtu odmocniny příliš malé číslo,
- Err 33 při výpočtu odmocniny příliš velké číslo,
- Err 34 při výpočtu průměru v paměti více než 255 hodnot,
v praxi nenastane
- Err 35 při výpočtu sm.odchylky v paměti více než 255 hodnot,
v praxi nenastane
- Err 36 buffer pro naměřené hodnoty je plný,
uloženo více než 100 hodnot
- Hodnoty C,D,Z, jsou mezivýsledky výpočtu.

Příloha č.2 - Reference přístrojů řady DOMENA k 2013-11-03

Firma:	Využití přístroje:	Kontakt:
STROJÍRNÝ POLDI a.s. Kladno 272 03, Dubská 243	Měření hloubky indukčně kalených vrstev čepů klikových hřídelí.	Ing.R.Černohorský, OŘJ, tel.312645162, 101, orj@strojpoldi.cz
SECO TRANS(býv.AGS) a.s. Jičín 50 648, Jungmannova 11	Měření tvrdosti HB odlitků z litiny s kuličkovým grafitem (LKG)	Ing.Kužel ved.OŘJ, 493 500890, kuzel@slv.ags.cz
Jihomoravská armaturka a.s., Hodonín 659 01, Lipová Alej 1	Měření tvrdosti HB odlitků z LKG.	Ing.Fr.Měchura ved.ŘJ slévárny, 518318314, mechura@imahod.cz
TRANSTRADE Jan Hanuš s.r.o. Vsetín 75501 Smetanova 1057	Separace tvrdých a měkkých odlitků z LKG a LLG (šedé litiny).	TK Juřička, 571412340, transtrade@vs.inext.cz
FOUNDEIK (býv.MORA Moravia) slévárna Mariánské Údolí 783 66	Separace tvrdých odlitků z LLG a LKG.	Ing. Jiří Herink TÚ, 587 414430, jiri.herink@foundeik.cz
Moravské Železářny a.s. Řepčinská 86, Olomouc 77900, slévárna LKG	Měření tvrdosti HB odlitků z LKG.	Ing.Fiala ved.sl., Ing. Marek ŘJ, 575812228, marek@mzol.cz
Moravské Železářny a.s. slévárna fitinků	Měření tvrdosti HB LKG, LLG odlitků.	Ing. J.Hojgr ved.sl., Ing. Langer ŘJ, 585712302, hojgr@mzol.cz
ANAH s.r.o., Vrahovická 23, Prostějov 796 21	Měření tvrdosti HB odlitků z LLG.	Ing. Julius Juhas ŘJ 582313765, slevarna-anah@slevarna-anah.cz
TŽ-slévárny a.s., Třinec 73965, Prmyslová 1001	Měření tvrdosti HB odlitků z LKG	Ing.Zd. Vladar ved.TÚ a ŘJ, 558533401, zdenek.vladar@trz.cz
TEDOM s.r.o., divize MOTORY, Jablonec n/N. 466 01, Belgická 400	Přejímka odlitků dle HB z LLG, diagnostika ventilů z austenit. ocelí.	Jindřich Merunka ved. Vst. TK, 483363143, skrbek@motory.tedom.cz
SIGMA Lutín 78350, J.Sigmunda 75.	Měření tvrdosti HB odlitků z LLG a LKG.	Ing.Vladimír Šolc ŘJ, 585 651 722, vsolc@mzl.cz
ELITEX slévárna a.s., Týniště nad Orlicí 517 21	Měření tvrdosti HB odlitků z LLG.	Ing. Dobiáš ředitel, Krejčíř TÚ, 494332513, jiri.krejcir@elitexslevarna.cz
Doc.Ing.B.Skrbek,Csc., TU SF katedra materiálu Hálkova 6, Liberec 46117	Aplikační vývoj a osvojení měření přístroji DOMENA.	485353606,3118 bretislav.skrbek@vslib.cz
SKS Krnov a.s., OMNIA group. Revoluční 77, 794 01 Krnov	Kontrola tvrdosti odlitků z LKG, LLG.	554611534, Ing. A. Jedinák, RJ, laborator@skskrnov.cz

Závislost mechanických vlastností šedých litin na tloušťce stěn
(a Ø D zkušebních tyčí) odlitků.

ČSN SE	tloušťka stěn [mm]		4 ÷ 7,9	8 ÷ 14,9	15 ÷ 29,9	30 ÷ 44,9	45 ÷ 80	80 ÷ 120
	Ø D [mm]		15	20	30	45	60	90
42 2410 1,05/1,11	min. Rm [MPa]		150 E ₀ =96,9	130 E ₀ =93,8	100 E ₀ =88,9	70 E ₀ =81	50 E ₀ =77,2	
	HB	min.	150	130	120	110	100	
	HB	max.	210	190	180	170	160	
42 2415 0,99/1,05	min. Rm [MPa]		200 E ₀ =109,9	180 E ₀ =106	150 E ₀ =97,3	120 E ₀ =91,6	100 E ₀ =88,9	
	HB	min.	170	150	140	130	120	
	HB	max.	230	210	200	190	180	
42 2420 0,99/0,93	min. Rm [MPa]		250 E ₀ =125	230 E ₀ =119,8	200 E ₀ =109,9	165 E ₀ =102,2	145 E ₀ =97,3	120 E ₀ =91
	HB	min.	200	180	160	150	140	130
	HB	max.	260	240	220	210	200	190
42 2425 0,93/0,87	min. Rm [MPa]		300 E ₀ =144	280 E ₀ =134	250 E ₀ =125	220 E ₀ =119,9	195 E ₀ =110,0	170 E ₀ =103,5
	HB	min.	220	200	180	170	160	150
	HB	max.	280	260	240	230	220	210
42 2430 0,93/0,81	min. Rm [MPa]			330 E ₀ =153,0	300 E ₀ =144,0	270 E ₀ =132,0	245 E ₀ =125,0	215 E ₀ =115,0
	HB	min.		220	200	190	180	170
	HB	max.		280	260	250	240	230
42 2435 0,81/0,75	min. Rm [MPa]			380	350 E ₀ =149,0	320	295	265
	HB	min.		230	210	200	190	180
	HB	max.		290	270	260	250	240

**POZNÁMKA: Platí pouze pro stěny neovlivněné výrazně
průtočností tekuté litiny při odlévání, tepelně nezpracované.**

Příloha č.1. LLG podle původních ČSN.

naměřené hodnoty na vzorku pro M3

M3		litina			
r	M1	M2	M3	M4	M0 cejch
0	233	223	215	212	212
1	340	349	348	348	197
2	336	329	323	328	197
3	334	330	330	331	206
4	325	315	321	315	202
5	274	289	287	285	192
∞	200	194	192	192	198

naměřené hodnoty na vzorku pro M8

M8		litina			
r	M1	M2	M3	M4	M0 cejch.
0	313	309	303	301	202
1	460	459	461	465	200
2	402	404	403	407	202
3	401	390	389	389	191
4	371	360	362	362	202
5	360	356	358	360	195
∞	207	197	196	192	201

hodnoty pro vynesení první závislosti MR je funkcí R(poloměru zkosení)

M3

litina

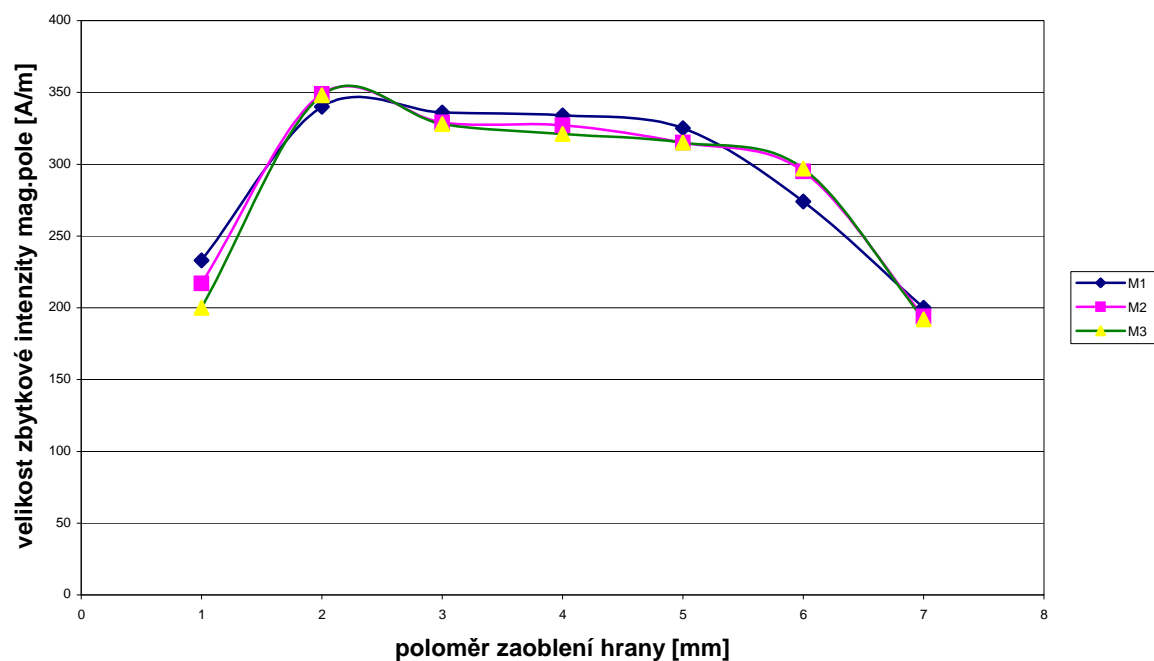
	M1	M2	M3
0	233	217	200
1	340	349	348
2	336	329	328
3	334	327	321
4	325	315	315
5	274	295	297
∞	200	194	192

M8

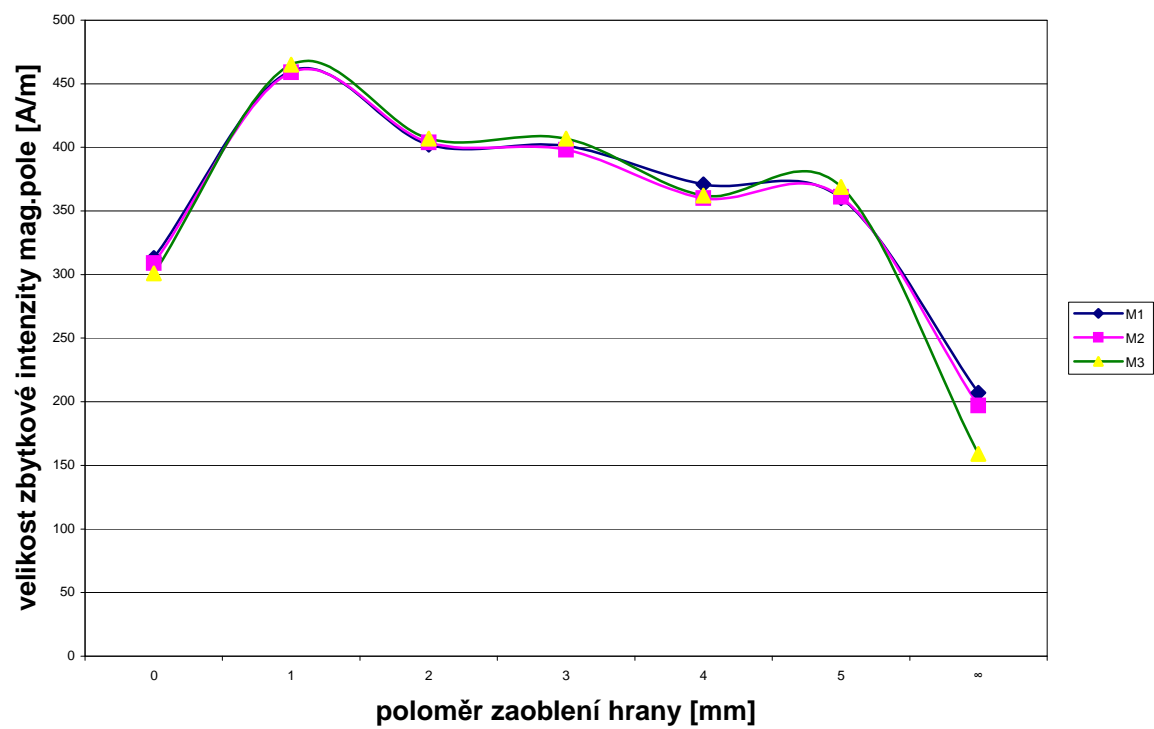
litina

	M1	M2	M3
0	313	309	301
1	460	459	465
2	402	404	407
3	401	398	407
4	371	360	362
5	360	361	369
∞	207	197	159

M3 Litina MR=f(R)



M8 Litina MR=f(R)



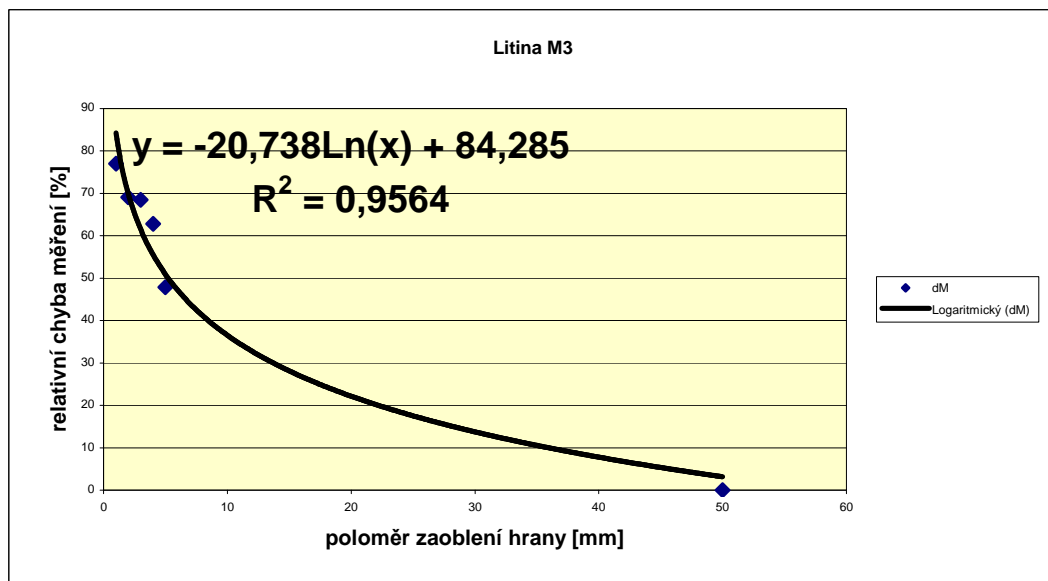
M3

litina

	M1	M2	M3	průměr
0	233	217	200	217
1	340	349	348	346
2	336	329	328	331
3	334	327	321	327
4	325	315	315	318
5	274	295	297	289
50	200	194	192	196
MR- M50	M1	M2	M3	průměr
0	33	23	8	21
1	140	155	156	150
2	136	135	134	135
3	134	133	136	131
4	125	121	123	122
5	74	101	105	93
50	0	0	0	0
dM	M1	M2	M3	průměr
0	16,5	11,8	4	10,7
1	70	79,8	81,2	77
2	68	69,6	69,8	69,1
3	67	68,5	70,1	68,5
4	62,5	62	64	62,8
5	37	52	54,6	47,9
50	0	0	0	0

dM

1	77
2	69,1
3	68,5
4	62,8
5	47,9
50	0



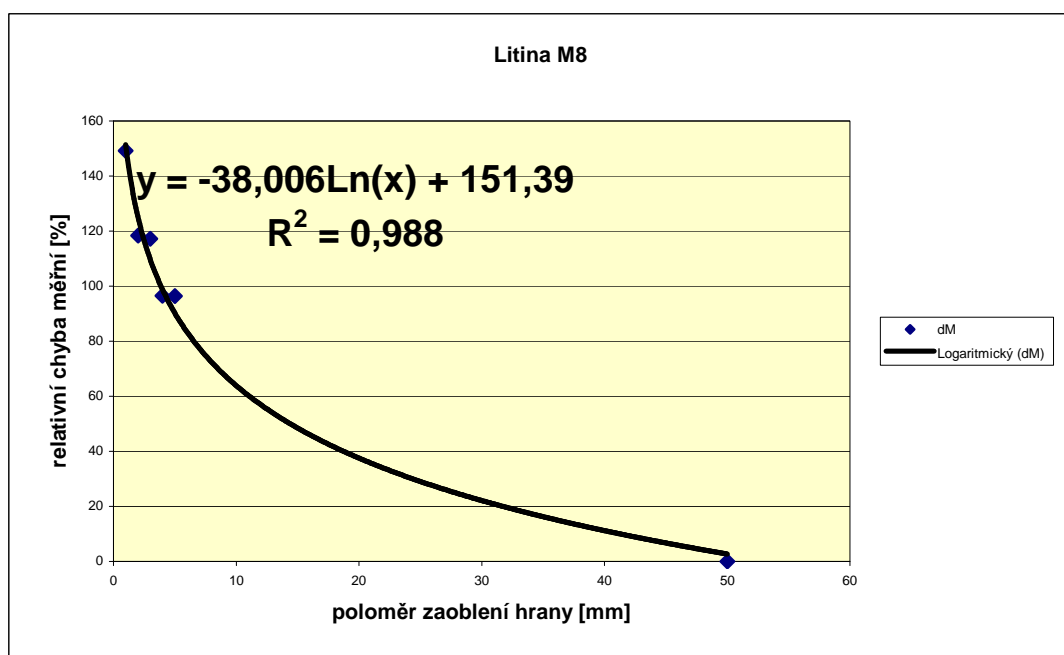
M8

litina

	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	313	309	301	307,6	307,6667
1	460	459	465	461,3	461,3333
2	402	404	407	404,3	404,3333
3	401	398	407	402	402
4	371	360	362	364,3	364,3333
5	360	361	369	363,3	363,3333
50	207	197	159	187,6	187,6667
MR- M50	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	106	112	142	120	120
1	253	262	306	273,7	273,6667
2	195	207	248	216,7	216,6667
3	194	201	248	214,3	214,3333
4	164	163	203	176,7	176,6667
5	153	164	210	175,7	175,6667
50	0	0	0	0	0
dM	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	51,20773	56,85279	89,30818	65,8	65,78957
1	122,2222	132,9949	192,4528	149,2	149,2233
2	94,2029	105,0761	155,9748	118,4	118,418
3	93,71981	102,0305	155,9748	117,2	117,2417
4	79,22705	82,74112	127,673	96,5	96,54704
5	73,91304	83,24873	132,0755	96,4	96,41242
50	0	0	0	0	0

dM

1	149,2
2	118,4
3	117,2
4	96,5
5	96,4
50	0



naměřené hodnoty na vzorku pro M3

ocel

r	M1	M2	M3	M4	M0 cejch
0	332	337	341	335	190
1	347	337	332	332	195
2	272	271	271	268	203
3	283	283	282	281	196
4	289	301	300	299	198
5	253	247	243	246	206
∞	166	149	136	137	202

naměřené hodnoty na vzorku pro M8

ocel

M8					
r	M1	M2	M3	M4	M0 cejch
0	406	403	406	411	186
1	312	310	312	309	200
2	410	408	404	402	200
3	365	365	373	380	197
4	358	358	359	358	190
5	324	324	324	324	198
∞	182	179	176	176	195

hodnoty pro vynesení první závislosti MR je funkcí R(poloměru zkosení)

M3

ocel

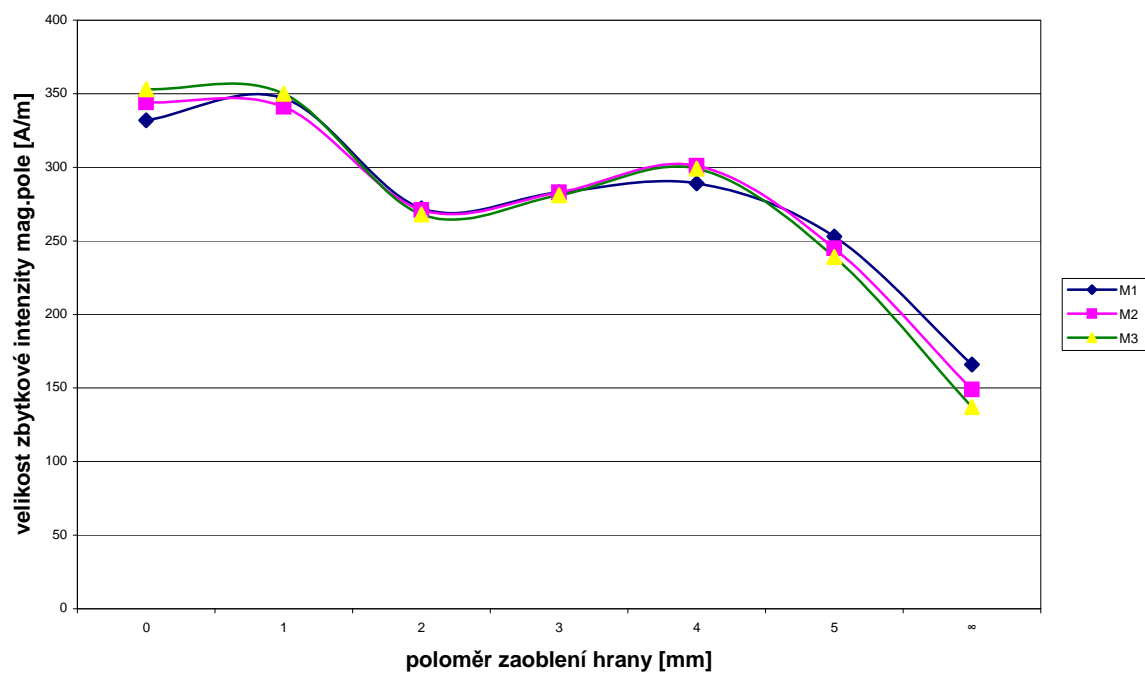
r	M1	M2	M3
0	332	344	353
1	347	341	350
2	272	271	268
3	283	283	281
4	289	301	299
5	253	245	239
∞	166	149	137

M8

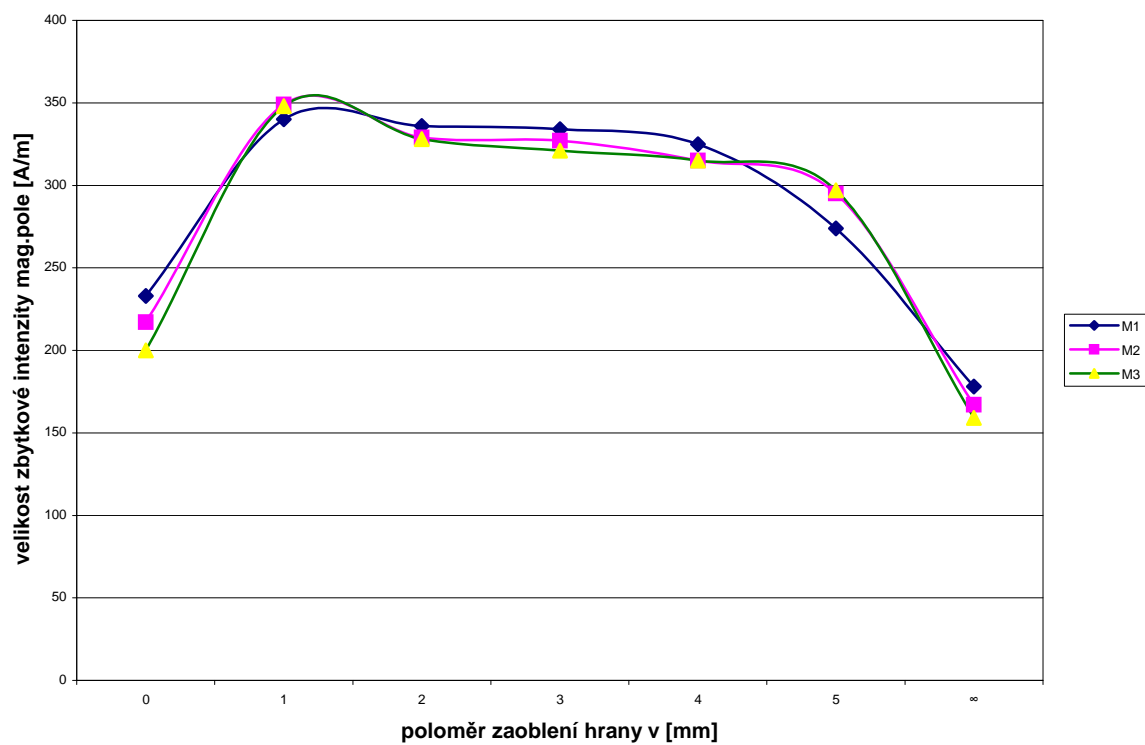
ocel

	M1	M2	M3
0	233	217	200
1	340	349	348
2	336	329	328
3	334	327	321
4	325	315	315
5	274	295	297
∞	178	167	159

M3 Ocel $MR=f(R)$



M8 Ocel $MR=f(R)$

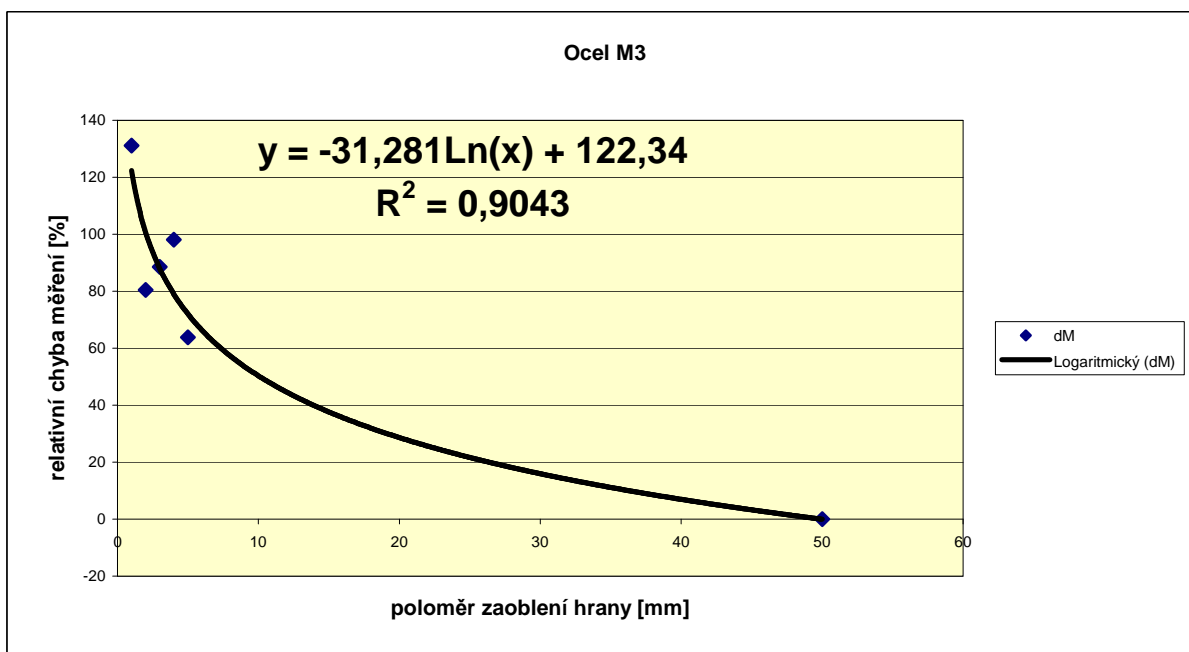


M3

ocel

	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	332	344	353	343	343
1	347	341	350	346	346
2	272	271	268	270,3	270,3333
3	283	283	281	282,3	282,3333
4	289	301	299	296,3	296,3333
5	253	245	239	245,7	245,6667
50	166	149	137	150,7	150,6667
MR- M50	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	166	195	216	192,3	192,3333
1	181	192	213	195,3	195,3333
2	106	122	131	119,7	119,6667
3	117	134	144	131,7	131,6667
4	123	152	162	145,7	145,6667
5	87	96	102	95	95
50	0	0	0	0	0
dM	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	100	130,8725	157,6642	129,5	129,5122
1	109,0361	128,8591	155,4745	131,1	131,1232
2	63,85542	81,87919	95,62044	80,4	80,45168
3	70,48193	89,93289	105,1095	88,5	88,5081
4	74,09639	102,0134	118,2482	98,1	98,11933
5	52,40964	64,42953	74,45255	63,8	63,76391
50	0	0	0	0	0

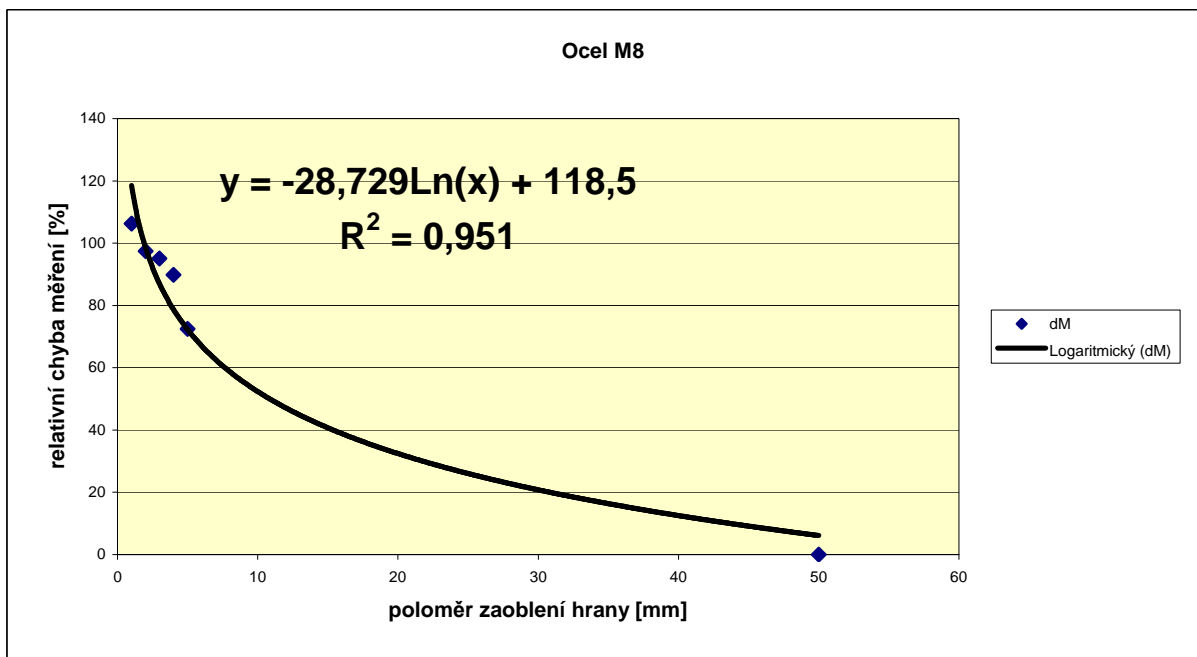
dM	
1	131,1
2	80,4
3	88,5
4	98,1
5	63,8
50	0



M8

	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	233	217	200	216,7	216,6667
1	340	349	348	345,7	345,6667
2	336	329	328	331	331
3	334	327	321	327,3	327,3333
4	325	315	315	318,3	318,3333
5	274	295	297	288,7	288,6667
50	178	167	159	168	168
MR- M50	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	55	50	41	48,7	48,66667
1	162	182	189	177,7	177,6667
2	158	162	169	163	163
3	156	160	162	159,3	159,3333
4	147	148	156	150,3	150,3333
5	96	128	138	120,7	120,6667
50	0	0	0	0	0
dM	M1	M2	M3	průměr	průměr
0	30,89888	29,94012	25,78616	289,9	28,87505
1	91,01124	108,982	118,8679	106,3	106,2871
2	88,76404	97,00599	106,2893	97,4	97,35311
3	87,64045	95,80838	101,8868	95,1	95,11188
4	82,58427	88,62275	98,11321	89,8	89,77341
5	53,93258	76,64671	86,79245	72,5	72,45725
50	0	0	0	0	0

dM	
1	106,3
2	97,4
3	95,1
4	89,8
5	72,5
50	0



Příloha č.5 - Metalografické hodnocení struktury litiny

1. Metalografické hodnocení struktury litiny

Metalografické hodnocení struktury dodaných vzorků litiny bylo provedeno na světelném mikroskopu Neophot 21 (Carl Zeiss Jena). Vzorky byly připraveny běžným metalografickým postupem, byly broušeny a leštěny, pro zvýraznění struktury byl použit Nital 3 %. Vzorky litiny byly sledovány dle ČSN 42 0461 jednak ve stavu neleptaném za účelem zjištění tvaru, velikosti a rozložení grafitu a dále ve stavu leptaném, kdy byl sledován charakter základní kovové hmoty. Struktury vzorků jsou uvedeny na následujících obrázcích.

Hodnocení dle ČSN EN ISO 945 (ČSN 42 0461)

Vzorek GJL 250

I C 4/5 - P1 - P 96 - Pd 1,4 - F 1/2 - Fr 1 - Fv 2000, tj. struktura litiny s lupínkovým grafitem o velikosti nad 60 do 250 μm , rozložení grafitu je smíšené. Struktura je dále tvořena lamelárním perlitem o disperzitě nad 1,3 do 1,6 μm a feritem, kterého je více než 2%, ale jehož obsah nepřesahuje 6%. Pseudobinární, popř. jemnozrnné ternární fosfidové eutektikum je vyloučeno v jednotlivých útvarech o velikosti do 2000 μm^2 .

Vzorek GJL 300

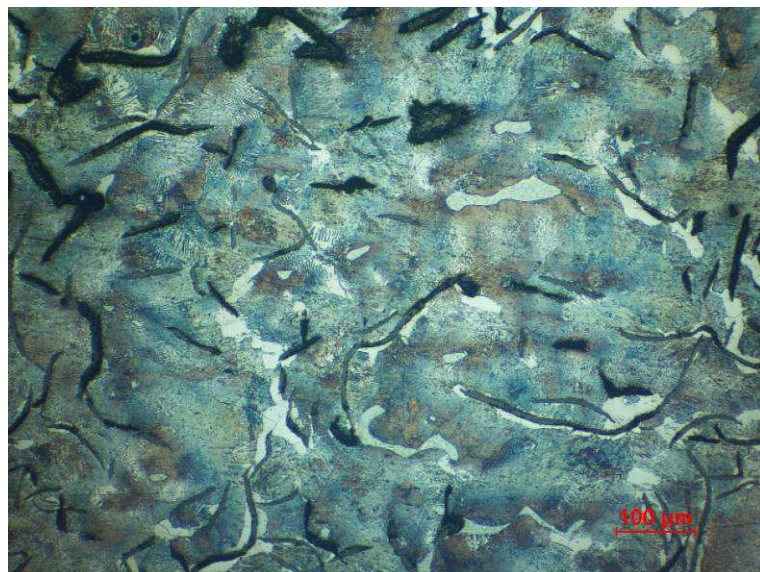
I C 5/6 - P1 - P - Pd 1 - F 2 - Fr 1 - Fv 2000, tj. struktura litiny s lupínkovým grafitem o velikosti nad 30 do 120 μm , rozložení grafitu je smíšené. Struktura je dále tvořena lamelárním perlitem o disperzitě nad 0,8 do 1,3 μm a feritem, jehož obsah nepřesahuje 2%. Jemnozrnné ternární fosfidové eutektikum je vyloučeno v jednotlivých útvarech o velikosti do 2000 μm^2 .

Vzorek GJL 250



Neleptáno

100 x



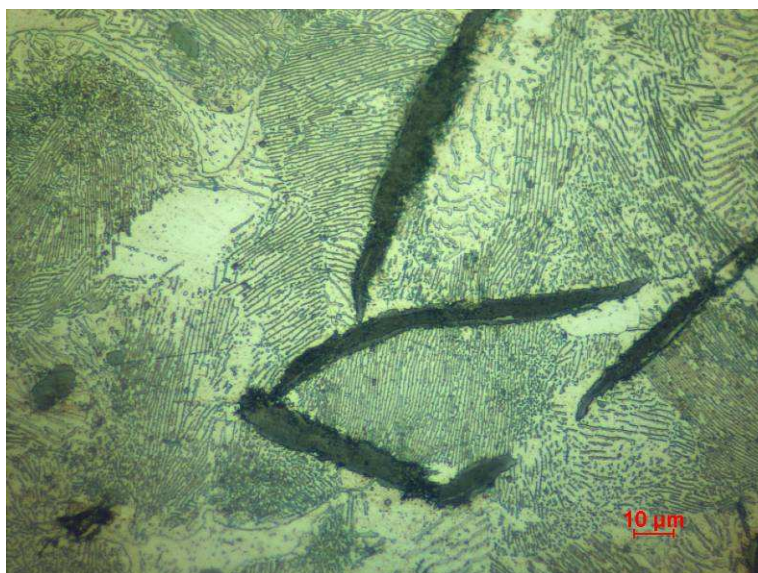
Leptáno

100 x



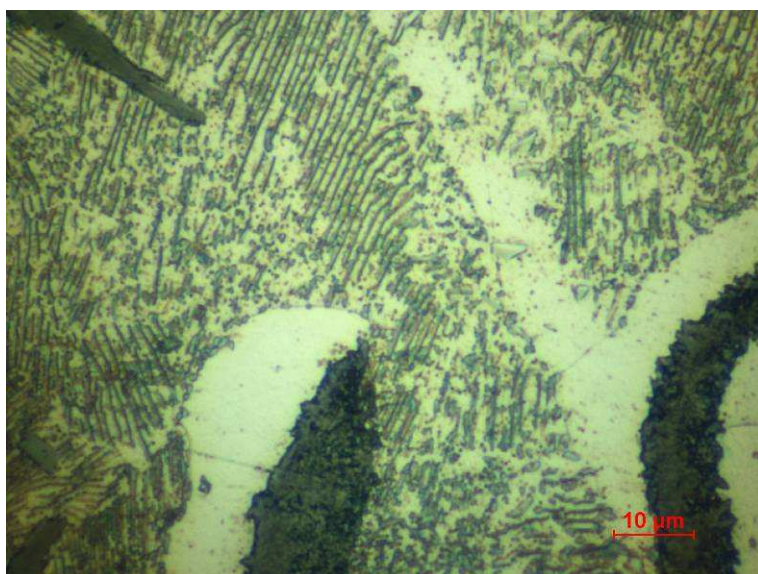
Leptáno

500 x



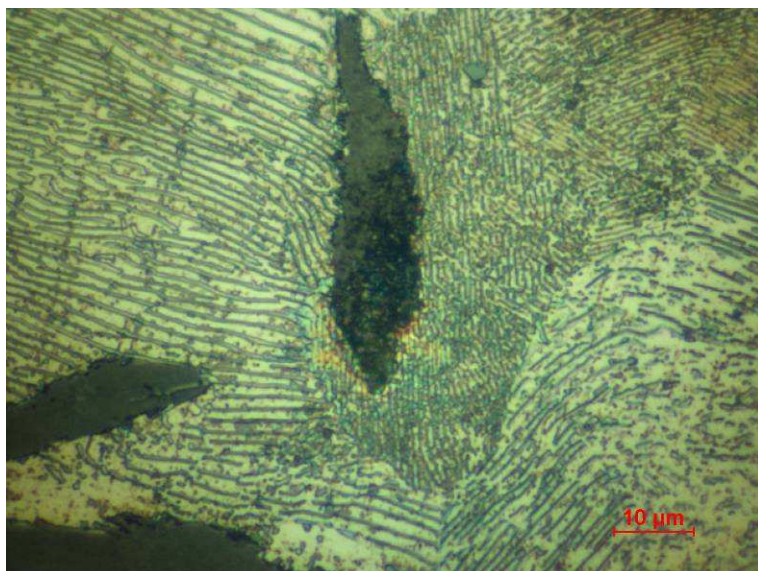
Leptáno

500 x



Leptáno

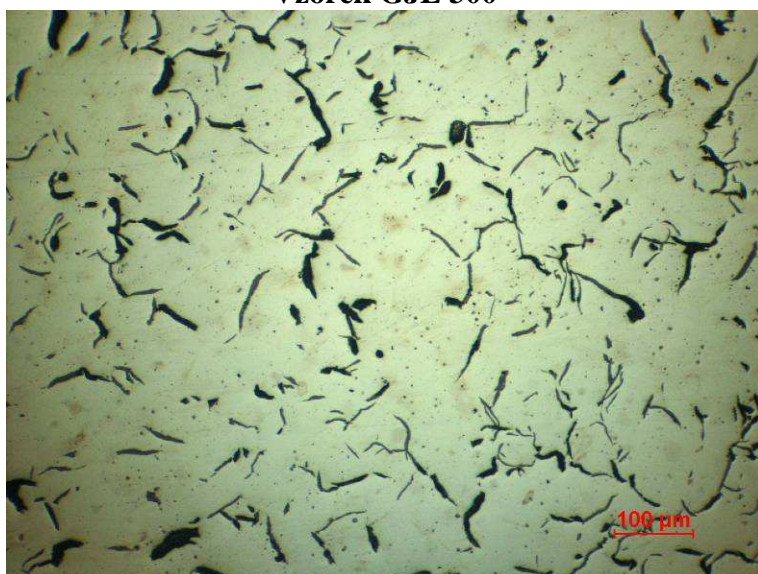
1000 x



Leptáno

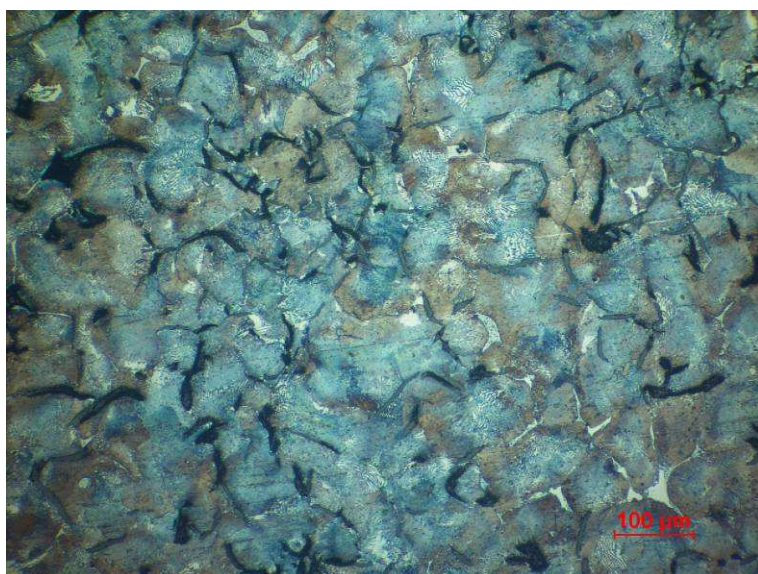
1000 x

Vzorek G.JL 300



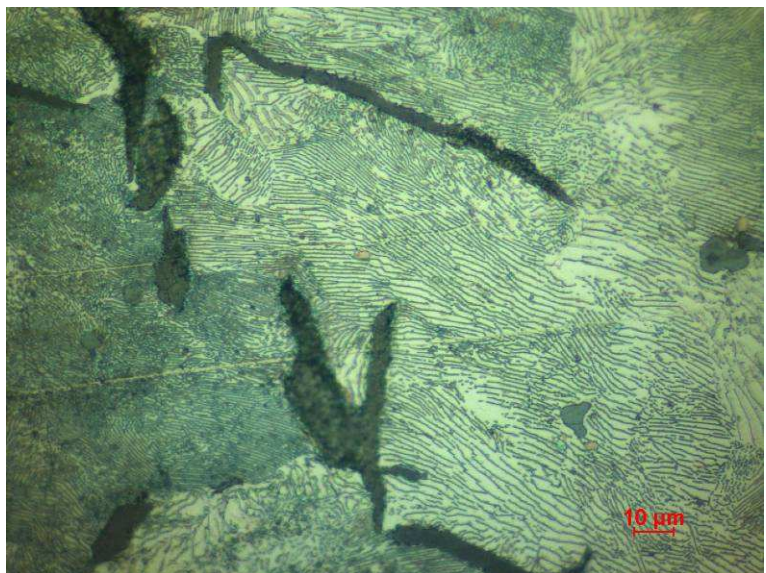
Neleptáno

100 x



Leptáno

100 x



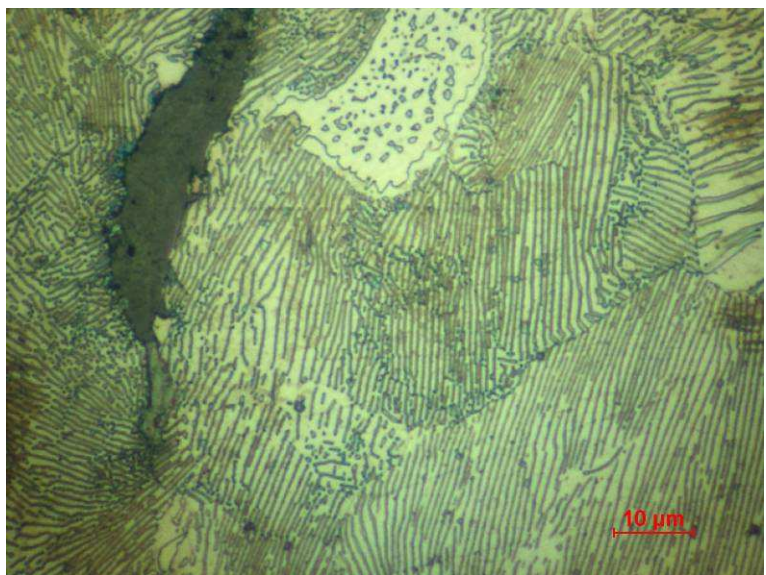
Leptáno

500 x



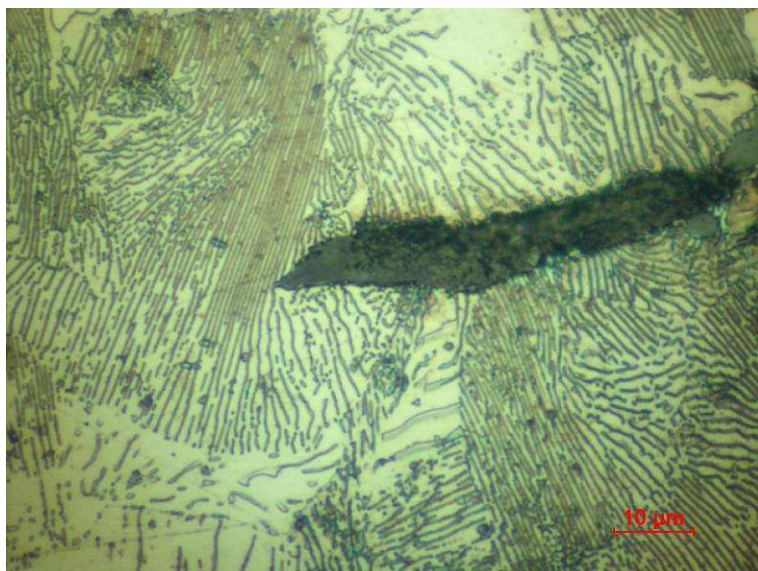
Leptáno

500 x



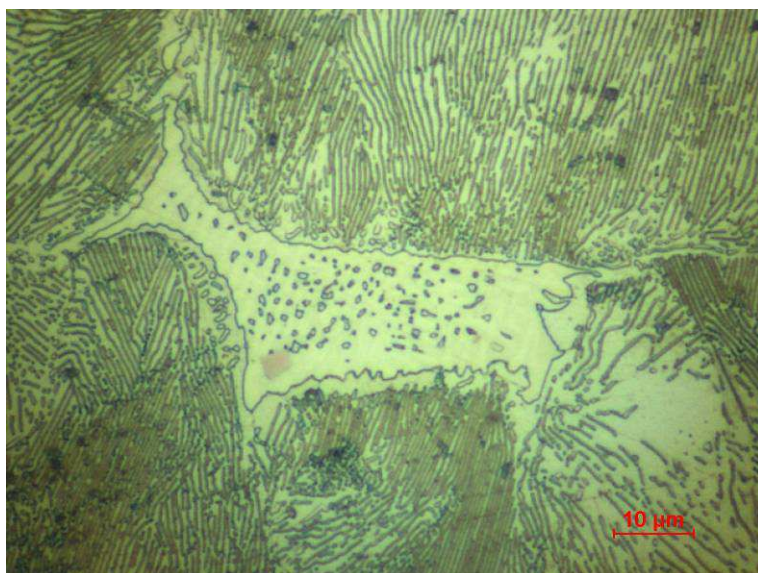
Leptáno

1000 x



Leptáno

1000 x



Leptáno

1000 x